



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2024-2025

LPNHE
PARIS



RAPPORT D'ACTIVITÉ
2024-2025

En 2024-2025, le LPNHE a poursuivi avec enthousiasme ses recherches fondées sur les grandes interrogations fondamentales de la physique des deux infinis : quels sont les composants ultimes de la matière ? De quoi est constitué l'Univers et quelle est son évolution depuis le Big Bang ? Quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire ? Bien d'autres questions sont liées à celles-ci, comme la nature du boson de Higgs, l'explication de l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'univers, les propriétés des neutrinos... Ces recherches s'appuient sur des instruments de pointe, développés au laboratoire grâce à nos compétences dans les capteurs silicium, la photométrie, 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 2024 a été marquée par la biennale du laboratoire, une retraite de quatre jours hors les murs afin de discuter du bilan et surtout des perspectives. Cette édition a été un vrai succès, tant par le nombre de participants que par la qualité de la participation de chacun. Une session poster et deux tables rondes ont permis à chacun de s'emparer de toute la diversité des projets menés au laboratoire. Nous avons notamment discuté des nouvelles R&D et des projets futurs, selon un plan qui structure l'activité du laboratoire.

L'année 2025 a été la première du nouveau contrat (2025-2029) du laboratoire avec les tutelles : nous avons ouvert cette nouvelle période avec un bouquet de résultats scientifiques de premier plan, largement repris par la presse. Le grand relevé spectroscopique de DESI a ouvert une nouvelle craquelure dans le modèle standard de la cosmologie avec l'indication d'une énergie noire qui varierait au cours de l'évolution de l'univers. Est-ce que cela annonce la fin de la constante cosmologique ? De nouvelles données seront nécessaires pour répondre à cette question. Les résultats de ZTF-2 et plus en général de l'analyse Lemaître, basés sur plusieurs milliers de supernovæ, auxquels l'équipe de cosmologie travaille avec une belle énergie, devraient fournir prochainement un éclairage très attendu.

L'expérience DAMIC-M de recherche directe de la matière noire au LSM (Modane) a commencé à produire des limites très fortes, même avec un détecteur de taille réduite. Plus sensibles que les précédentes d'au moins un ordre de grandeur, elles commencent à exclure des plages importantes des modèles de référence. Dans le domaine de la physique de précision, l'exploration du moment magnétique anormal du muon continue sur la base des données de Babar, utilisée presque vingt ans après la prise de données pour la prédiction théorique. Cette anomalie pourrait devenir un des tests les plus précis du Modèle Standard !

Après presque deux décennies de préparation et construction, mobilisant une équipe importante au LPNHE, c'était avec grand plaisir que le laboratoire a fêté en juillet 2025 la première lumière pour l'observatoire Vera Rubin et son télescope LSST. Il s'agit d'un relevé du ciel profond qui pourrait révolutionner notre connaissance de l'Univers. Dans les premières magnifiques images, les galaxies sont apparues sous une nouvelle lumière, tout entourées qu'elles sont d'un halo de gaz très lumineux.

Last but not least, nous avons fêté la médaille d'argent 2025 du CNRS de Vava Gligorov, pour ses travaux innovants dans le domaine du calcul informatique temps réel et des analyses des désintégrations rares des mésons beaux.

Nous préparons aussi activement les nouveaux projets et de jouvences majeures des détecteurs existants. C'est le cas de la phase haute luminosité de l'accélérateur LHC au CERN (Genève) : dans ce cadre les équipes travaillent à la construction de deux grands détecteurs silicium pour ATLAS, ITk et HGTD, qui mettent en œuvre des techniques de pointes dans le domaine du micro-câblage, d'assemblage et de tests des détecteurs semi-conducteur. Pour l'expérience LHCb, nous avons conçu et nous développons le projet RTA qui vise à reconstruire en ligne les événements, traitant un flot de données jusqu'à 25 Tb/s.

HyperKamiokande, qui a récemment achevé la construction de sa caverne, sera le plus grand détecteur souterrain de neutrinos. L'équipe du LPNHE, qui a en charge le système de génération et de distribution de temps, s'apprête à déployer ce dispositif au Japon en 2027. Cette expérience sera aussi un formidable télescope ouvert sur les neutrinos du cosmos, notamment ceux produits par certaines supernovæ, et permettra d'étendre considérablement les activités de l'équipe.

Pour le grand observatoire d'astronomie gamma CTA, le laboratoire a en charge la production de l'électronique de la caméra NectarCam pour les télescopes de taille moyenne, production qui est désormais bien avancée. Le premier exemplaire pathfinder devrait être installé en 2026 au Chili. Toujours dans le domaine des rayons cosmiques, Olivier Martineau, en collaboration avec Kumiko Kotera de l'IAP, a obtenu un financement ERC Synergy pour HERON, un projet ambitieux de radio-détection de neutrinos de ultra-haute énergie qui sera déployé en Argentine.

Le laboratoire compte environ 50 chercheuses et chercheurs, enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs, et une quarantaine de doctorantes, doctorants, post-doctorantes et post-doctorants, et membres émérites et bénévoles. L'équipe technique est forte d'une quarantaine de personnes et est structurée en services techniques et administration. Le laboratoire est un acteur important dans le rayonnement de la discipline dans un contexte scientifique et culturel d'exception. Sa situation au cœur de Paris et l'amphithéâtre de recherche Georges Charpak en font aussi un centre idéal de rencontres scientifiques de haut niveau.

Le LPNHE a tissé des liens étroits avec d'autres laboratoires de Sorbonne Université, notamment grâce à l'Initiative de la Physique des deux Infinis (IPI) de Sorbonne Université et à la Fédération de Recherche sur les Interactions Fondamentales. Cette priorité à une politique de site a permis des collaborations fructueuses en particulier avec l'IAP, le LPTHE et l'Observatoire de Paris et une première collaboration avec le LKB. C'est avec enthousiasme que nous allons construire avec nos collègues le nouvel Institut Cosmos, alliant sciences physiques et lettres.

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). FCC sera une sonde puissante du boson de Higgs et de la physique électrofaible. Dans le cadre de la préparation de FCC et dans le cadre de R&D européen DRD, une R&D ambitieuse dans le domaine des détecteurs silicium a été lancée, en collaboration avec d'autres laboratoires du CNRS/IN2P3.

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 : un nouveau centre d'usinage à commande numérique, un FabLab, des salles blanches qui bénéficient d'une jouvence majeure, des nouveaux espaces d'expérimentation. Deux plateformes, CLAP pour les détecteurs semi-conducteurs et PCS pour le calcul et stockage, sont ouvertes aux autres laboratoires du périmètre.

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

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





SOMMAIRE

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

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

ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES	11
--	-----------

Masses et interactions fondamentales (MIF)	12
---	-----------

Asymétrie Matière Anti-matière (AMA)...	28
--	-----------

Astrophysique MultiMessenger et Matière Noire (AM3N)	44
---	-----------

Cosmologie	60
-------------------------	-----------

SOUTIEN À LA RECHERCHE	74
-------------------------------------	-----------

Services techniques	76
----------------------------------	-----------

Plateaux technique et plateformes	79
--	-----------

Support à la recherche	86
-------------------------------------	-----------

ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET FORMATION PAR LA RECHERCHE	100
---	------------

Implication dans l'enseignement supérieur	101
--	------------

Les thèses au LPNHE	103
----------------------------------	------------

Les stages au laboratoire	105
--	------------

VIE DU LABORATOIRE	108
---------------------------------	------------

Réunions et rencontres	110
-------------------------------------	------------

Missions internes au laboratoire	114
---	------------

Le laboratoire au cœur de la société ...	118
---	------------

Initiatives scientifiques et techniques parallèles	125
---	------------

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS ET RESPONSABILITÉS	130
--	------------

STRUCTURE DU LABORATOIRE	136
---------------------------------------	------------

Organigramme	136
---------------------------	------------

Membres du laboratoire au 31 décembre 2025	137
---	------------

Stagiaires accueilli.es au laboratoire sur la période 2024-2025	138
--	------------

Instances du laboratoire	138
---------------------------------------	------------

Chargé.es de mission et groupes de travail au 31 décembre 2025	139
---	------------

INDEX DES ACRONYMES	140
----------------------------------	------------

FAITS MARQUANTS

2024

FÉVRIER



• Réception du rapport de l'HCERES sur l'unité : « During the evaluation period, the unit continued to consolidate its reputation as a first-class unit in its field. »

MARS



• Rénovation de la Machine à Mesurer Tridimensionnelle
• Les Master-classes ont lieu au LPNHE, sur la thématique LHCb : 76 élèves issus de cinq lycées reçus au laboratoire

AVRIL



• Réception de l'impression du rapport d'activité 2022-2023



• Lucile Mellet, ancienne doctorante du groupe neutrinos, a reçu le prix 2024 TYL-FJPPL Young Investigator Award
• Le workshop « Top LHC France 2024 » se tient du 9 et 10 avril dans l'amphithéâtre Charpak
• Finalisation de la mise à niveau du détecteur proche ND280 de l'expérience T2K

MAI

• Arrivée de la Caméra LSST au Chili



• Du 28 au 31 mai 2024, biennale du laboratoire à Chambon-sur-Lac

JUIN



• Du 13 au 28 juin, exposition « Galilée & la navigation satellitaire », campus Pierre et Marie Curie

JUILLET



• Le campus Pierre et Marie Curie à l'heure des Jeux Olympiques de Paris 2024 auxquels neuf étudiantes et étudiants sportifs de haut de niveau de Sorbonne Université et 5 alumni de l'université ont participé. Parmi eux, quatre ont remporté des médailles.



• StarDice : installation de l'étoile artificielle à l'observatoire de Haute-Provence, début du relevé

SEPTEMBRE

• À partir de cette rentrée universitaire, le laboratoire émerge auprès de l'École Doctorale PIF (Physique en Île-de-France)



• Ouverture de la période des soutenances de thèses : neuf soutenances cette année



• Quatre membres du laboratoire forment une équipe au T24 du Touquet, un triathlon sur 24h en continu et en relais, les 7 et 8 septembre. Sorbonne Université, avec deux équipes en lice, remporte le Challenge Universitaire.

OCTOBRE



• Du 10 au 13 octobre 2024, fête de la science sur le thème « Océan de savoirs »
• Accueil de collègues de l'IJClab, suite à l'inondation du campus Paris-Saclay par l'Yvette



• Déploiement de 65 antennes sur le site de GRAND-Proto300 (désert de Gobi)

NOVEMBRE

• Qualification du cluster Parisien pour la production ITK



• Le 29 novembre, colloque autour du 50^{ème} anniversaire de la découverte du quark charmé

• Publication des premiers tests de la gravité aux échelles cosmologiques avec les données collectées pendant 1 an par DESI (DR1)



• Fabrication du premier détecteur unit de HGTD comportant 3 modules, destiné aux tests thermiques et à la tenue aux radiations

DÉCEMBRE



• Premier test de XeLab : remplissage puis récupération sans perte avec du xénon liquide



• Installation d'un télescope à muons, au cœur de la chaîne des Chyulu, Kenya



• Cérémonie de remise des Palmes académiques à Isabelle Cossin à Sorbonne Université, tour Zamensky
• Le conseil scientifique du 18 décembre est consacré à ATLAS aux upgrades HGTD et ITK
• Détection autonome des premiers rayons cosmiques avec les instruments GRAND@Auger et GRANDProto300
• CTAO : premier lot de production de la FEB (Front End Board) finalisé



• Jeanne Laberrigue-Frolow, une des physiciennes à l'origine du LPNHE, s'est éteinte à près de 100 ans le 18 décembre

2025

JANVIER

- Le mandat de Marco Zito à la direction du LPNHE est renouvelé pour cinq ans
- Début de la production de modules ITk au laboratoire



- UPCité fête ses 5 ans
- Symposium national pour la préparation de la contribution de la communauté française à l'ESPPU (stratégie européenne en physique des particules), tenu au centre international de conférences de SU
- Installation du FabLab du laboratoire

FÉVRIER

- L'exploitation de H.E.S.S. est officiellement prolongée jusqu'en septembre 2028
- Installation et mise en service de la TPC et première lumière détectée dans XeLab

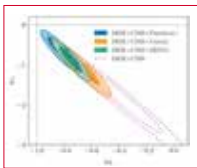


- Installation de la Caméra LSST sur le télescope Simonyi
- Élections au laboratoire pour le conseil de laboratoire, le conseil scientifique et la commission du personnel locale



- Le groupe LHCb du laboratoire intègre le projet IN2P3/CERN de carte électronique Back End de LHCb

MARS



- Mise à jour des mesures de distances cosmiques et implications pour la nature de l'énergie noire avec 3 ans de données collectées par DESI
- Nouvelles limites sur l'existence de matière noire par la collaboration DAMIC-M
- Audit du laboratoire par la DR2 du CNRS, réalisé conformément à la méthodologie explicitée dans le « Référentiel d'audit régional CNRS », qui valide dans ses conclusions le bon suivi des procédures administratives (achats, missions...)



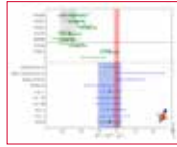
- Les Master-classes ont lieu au LPNHE, cette année sur deux thématiques, LHCb et CMS. Le laboratoire accueille ainsi 77 élèves venant de trois lycées

AVRIL



- Les collaborations ATLAS et LHCb reçoivent le prix "Breakthrough Prize" 2025, pour la physique fondamentale
- Le workshop « Top LHC France 2025 » se tient en amphithéâtre Charpak du 29 et 30 avril

MAI



- Une nouvelle prédiction du moment magnétique du muon dans le cadre du modèle standard permet d'éliminer la tension statistique historique (dite anomalie g-2)

JUIN

- 23 juin, les premières images prises avec le télescope grand champ de l'Observatoire Vera Rubin sont dévoilées



- Vladimir Gligorov, physicien des particules au LPNHE, médaillé d'argent du CNRS 2025



- Caractérisation de la source de calibration en champ plat de NectarCAM

JUILLET



- Colloque "première lumière LSST" à l'amphithéâtre Charpak
- Mise en route et qualification du robot de collage pour la production de Support Unit HGTD au LPNHE
- Tenue de la conférence internationale BridgeQG 2025 dans l'amphithéâtre Charpak, du 7 au 10 juillet



- La centrale de traitement de l'air pour les salles blanches est fonctionnelle après plusieurs semaines de travaux, la salle blanche est désormais à nouveau opérationnelle
- 31 juillet 2025, l'Université de Tokyo a achevé le creusement de la caverne colossale qui abritera le volume du détecteur principal d'Hyper-Kamiokande

AOÛT

- Premier module ITk complet et fonctionnel
- Nouveau plafond soufflant installé dans le sous-sol du couloir 22-23

SEPTEMBRE

- Lancement des travaux autour du rapport d'activité 2024-2025, mise en place du comité de rédaction



- Année record de thèses soutenues au laboratoire (13 !) à l'automne

OCTOBRE



- Du 9 au 12 octobre, fête de la science sur le thème « Intelligence(s) »
- Publication des résultats combinés d'une analyse conjointe T2K-SK et T2K-NOvA sur les paramètres d'oscillation des neutrinos (publication dans Nature)
- Sélection par le programme ERC Synergy du projet HERON (génération future de télescopes radio pour la recherche de neutrinos)



- Sortie du livret d'accueil du LPNHE à l'attention des postdocs, doctorants et doctorants notamment étrangers



- Présentation de clichés de chambres à bulles issus des archives patrimoniales du laboratoire à La Capsule, dans le cadre de la biennale Nemo d'art numérique de la région Île-de-France

NOVEMBRE

- Le conseil scientifique du 25 novembre est consacré à PIONEER et DESI-II

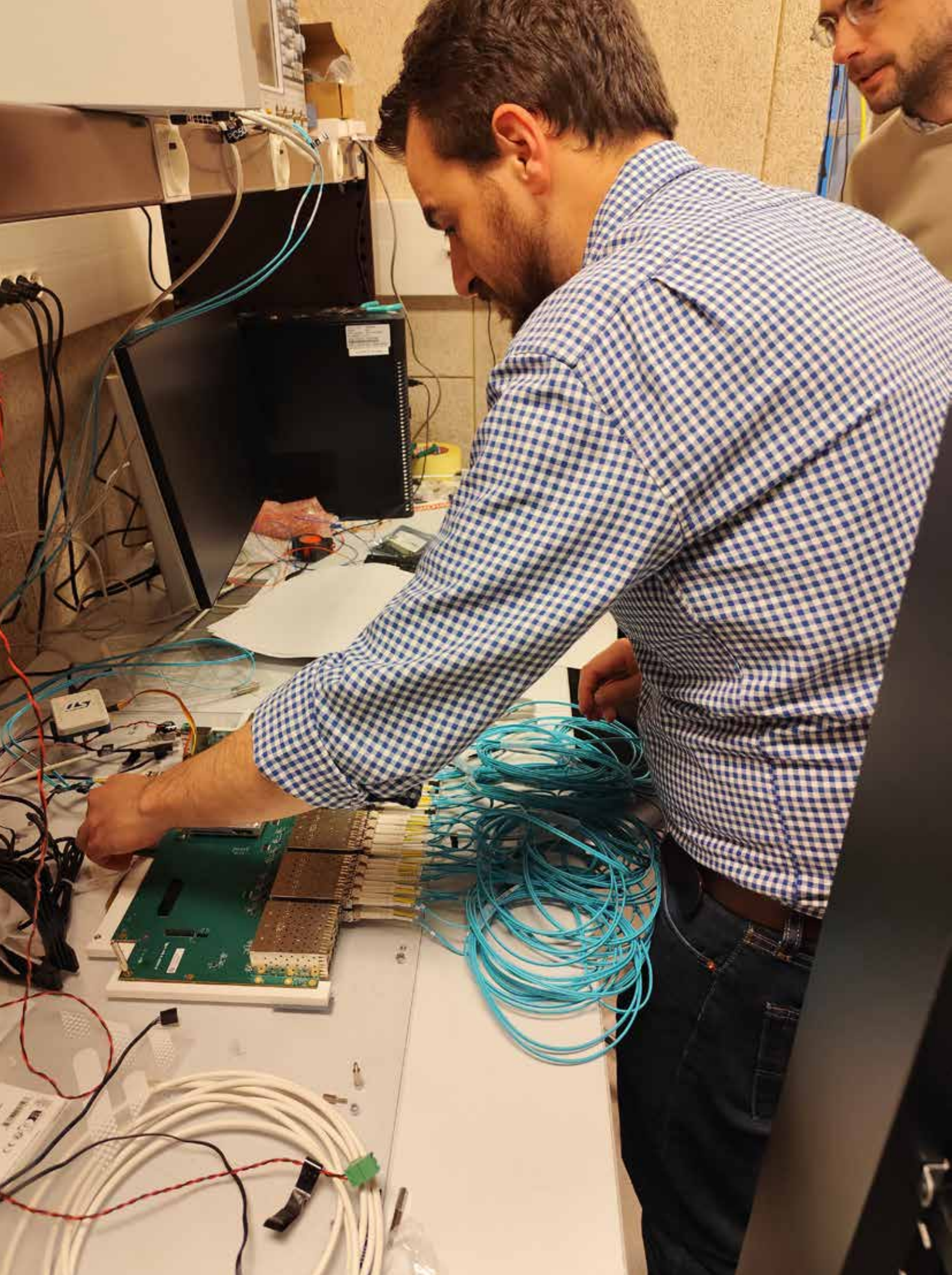


- Fin des travaux de rénovation dans les salles au rez-de-chaussée du laboratoire, qui retrouve notamment l'usage de la salle des séminaires

DÉCEMBRE



- Premiers 100 modules ITk de production finalisés
- Première chaîne *scene-modeling* intégrée capable de traiter plusieurs centaines de TB d'images de supernovæ pour la cosmologie (projet Lemaître)



ACTIVITÉS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Masses et Interactions Fondamentales (MIF)

- **ATLAS HGTD - un Détecteur Hautement Granulaire pour une mesure de Temps d'une extrême précision**
- **ATLAS ITk - Construction d'un trajectographe de nouvelle génération**
 - La haute luminosité du LHC : un défis pour les détecteurs
 - Des capteurs minces et performants pour le niveau de radiation typique de l'ITk
- **Études de performances e/γ et assurance qualité des données**
- **Des jets partout au LHC : études de physique, calibration et étiquetage des jets**
- **Physique du Quark Top**
- **Physique du boson de Higgs**
- **Recherche de formes exotiques de matière noire**
- **Prospectives pour la physique au FCC-ee**
- **Le g-2 du muon: signal ou contrainte pour la Nouvelle Physique ?**
- **Activités de machine learning pour la simulation et l'analyse**
 - Génération d'événements et simulation des détecteurs
 - Analyse des données et phénoménologie
 - *Unfolding*

Asymétrie Matière Anti-matière (AMA)

- **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)
 - L'activité sur le projet PCIe400 pour l'upgrade II
- **La physique des neutrinos au Japon : de T2K à Hyper-Kamiokande**
 - Nouvelle phase de l'expérience T2K
 - Projet Hyper-Kamiokande : phase de construction
- **Expérience COMET à J-PARC**

Astrophysique MultiMessenger et Matière Noire (AM3N)

- **Astrophysique des hautes énergies et physique fondamentale avec H.E.S.S.**
 - Fonctions de réponses instrumentales
 - Étude astrophysique et suivi des noyaux actifs de galaxies
 - Décalage spectraux : recherche d'une éventuelle violation d'invariance de Lorentz
 - Recherche indirecte de matière noire
- **Le Cherenkov Telescope Array Observatory, le prochain observatoire en rayons gamma de très hautes énergies**
 - Développement et production des cartes *Front End Board* pour la caméra NectarCAM

- Calibration de la caméra NectarCAM
- Effets temporels intrinsèques dans les noyaux actifs de galaxie et violation de l'invariance de Lorentz
- Prospectives sur les études de noyaux actifs de galaxies avec CTAO
- **GRAND : *the Giant Radio Array for Neutrino Detection***
 - Les prototypes GRAND
 - Le projet HERON
- **DAMIC-M leader mondial de la recherche de matière noire leptophilique**
 - Technique
 - Des résultats scientifiques exceptionnels
- **Recherche directe de matière noire avec l'expérience XENONnT**
 - XENON1T
 - Techniques de détection et d'analyse
 - Publications de physique
 - Contributions du LPNHE

Cosmologie

- **Première lumière de l'observatoire V. Rubin**
 - Réalisations techniques
 - *Commissioning* du plan focal de LSST
 - Le système changeur de filtre de LSST
- **Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP**
 - Le relevé photométrique StarDICE
 - Développement et démonstration des *Collimated Beam Projector*
- **Le projet Lemaître : une mesure indépendante de l'évolution de l'équation d'état de l'énergie noire**
- **Contraindre la cosmologie avec la cartographie tridimensionnelle des grandes structures de l'univers obtenue par DESI**
 - Introduction
 - Analyse standard
 - Au-delà des méthodes standard
 - Contributions techniques pour la deuxième phase de DESI, DESI-II
- **Cisaillement cosmique**
- **Théorie de la formation des structures cosmologiques**

Masses et Interactions Fondamentales (MIF)

- ATLAS HGTD - un Détecteur Hautement Granulaire pour une mesure de Temps d'une extrême précision
- ATLAS ITk - Construction d'un trajectographe de nouvelle génération
 - La haute luminosité du LHC : un défis pour les détecteurs
 - Des capteurs minces et performants pour le niveau de radiation typique de l'ITk
- Études de performances e/γ et assurance qualité des données
- Des jets partout au LHC : études de physique, calibration et étiquetage des jets
- Physique du Quark Top
- Physique du boson de Higgs
- Recherche de formes exotiques de matière noire
- Prospectives pour la physique au FCC-ee
- Le $g-2$ du muon: signal ou contrainte pour la Nouvelle Physique ?
- Activités de machine learning pour la simulation et l'analyse
 - Génération d'événements et simulation des détecteurs
 - Analyse des données et phénoménologie
 - *Unfolding*



Masses et Interactions Fondamentales (MIF)



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 les programmes ultérieurs. 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'asy-

métrie matière/antimatière à l'échelle subatomique ne permettent pas de comprendre l'absence d'antimatière observée à très grande échelle.

L'équipe Masse et Interactions Fondamentales (MIF) 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 prédits par le Modèle Standard ;
- recherche directe de nouvelles particules.

Activités sur l'expérience ATLAS

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 (2015-2018) ainsi qu'à l'exploitation de celles du Run 3 qui a démarré à l'été 2022 et se terminera l'été 2026.

L'équipe ATLAS du LPNHE développe un programme ambitieux qui couvre à la fois la construction des détecteurs permettant la jouvence du détecteur ATLAS pour le HL-LHC, où il fera face à l'enregistrement simultané de collisions proton-proton pouvant aller jusqu'à 200, l'amélioration des performances fines d'ATLAS et l'analyse de plusieurs canaux de physique via des techniques innovantes s'appuyant fortement sur le machine learning. Le groupe joue un rôle moteur dans plusieurs sous-systèmes clés d'ATLAS qui exploiteront des détecteurs silicium de dernière génération sur lesquels le LPNHE a développé une expertise de pointe. Il explore également des signatures cruciales de physique au-delà du Modèle standard, en particulier dans le secteur sombre, et contribue à l'étude du secteur de Higgs et du quark top.

...

Sur le plan instrumental, le LPNHE est un acteur central du High Granularity Timing Detector (HGTD), depuis la R&D sur les capteurs LGAD et les algorithmes de reconstruction jusqu'à la conception et la fabrication industrielle des unités de détection, avec un engagement majeur dans la production des modules pour la phase HL-LHC. En parallèle, le laboratoire contribue de façon décisive au nouvel trajectographe silicium ITk (Inner TrackKer), où il a porté la technologie des capteurs minces n-in-p, qualifié des fonderies et mis en place les infrastructures d'assemblage et de contrôle qualité pour une fraction importante des modules du tonneau externe.

L'équipe assure également des responsabilités fortes sur la performance des électrons et photons et l'assurance qualité des données prises par ATLAS, en particulier dans un contexte de forte luminosité où le contrôle de l'empilement et des incertitudes systématiques devient déterminant. Elle développe de nouvelles méthodes de reconstruction du temps d'arrivée des particules dans les calorimètres et de caractérisation des gerbes électromagnétiques, améliorant le système de déclenchement permettant la collecte d'événements contenant des électrons et des photons, isolés ou produit par paires fortement boostées, de mieux rejeter l'empilement et d'ouvrir l'accès à des signatures de particules de longue durée de vie à partir du calorimètre électromagnétique.

Sur le plan physique, le groupe mène un programme ambitieux de recherche de matière noire exotique au LHC, fondé sur la recherche de résonances diphoton promptes ou différées attendues dans des scénarios où des particules de type axion (ALP) agissent comme médiateurs entre le secteur standard et le secteur sombre. Ce programme s'appuie sur une réinterprétation systématique des analyses publiées par le LHC, sur des collaborations internationales structurantes (notamment via des projets ANR et COFECUB) et sur le développement de nouvelles stratégies d'analyse adaptées à des signatures très collimées ou faiblement couplées. Le groupe contribue également depuis la découverte du boson de Higgs en 2012 à l'étude avancée du secteur de Higgs. Il a notamment participé récemment à la mesure des couplages du Higgs avec les quarks lourds en particulier via le canal en deux quarks beaux produits en association avec un boson W ou Z dans des régimes résolus ou boostés. L'équipe contribue également à la recherche de l'autocouplage du boson de Higgs prévu par le Modèle Standard, une physique où les techniques de sous-structure de jets et une interprétation en termes de théorie effective des champs permettent de sonder directement la structure du secteur de brisure électrofaible. Sur le front des mesures standard, le groupe poursuit son programme de mesure de la masse du top en utilisant des désintégrations de quark top en

W b. Avec leurs collaborateurs d'ATLAS, les membres du groupe ont reçu le Breakthrough Prize 2025 pour la contribution de la collaboration au développement de la science sur la base des données du Run 2 du LHC.

Les activités de *machine learning* constituent également un fil conducteur transversal, avec des développements allant de la génération d'événements et de la simulation rapide de détecteurs à l'étalonnage avancé et à la résolution de problèmes inverses multidimensionnels (*unfolding* en particulier). L'équipe conçoit et met en œuvre des architectures modernes (transformeurs, réseaux profonds dédiés aux gerbes électromagnétiques et à la sous-structure de jets, méthodes génératives) pour améliorer la précision des simulations, optimiser les performances des sous-systèmes d'ATLAS et renforcer la sensibilité des recherches de nouvelle physique, notamment pour les objets boostés et les signatures rares. Enfin, le groupe est aussi fortement impliqué dans la mise en place et le suivi des moyens de calcul et de stockage de l'expérience.

Préparation des expériences du futur

L'équipe MIF contribue à l'étude des prochaines expériences en contribuant à l'effort européen consistant à étudier la possible construction d'un nouveau collisionneur de 90 km au CERN, le Future Circular Collider (FCC), qui permettrait de gagner un ordre de grandeur en énergie par rapport au LHC à l'horizon 2070 avec deux phases d'exploitation : un collisionneur e^+e^- à partir de 2045 environ qui permettra d'étudier avec une grande précision le secteur du Higgs, un collisionneur p-p permettant d'explorer un domaine d'énergie totalement nouveau et qui serait une machine de recherche à l'image du LHC.

Compréhension des différences entre prédictions du $g-2$ du muon et ses mesures expérimentales

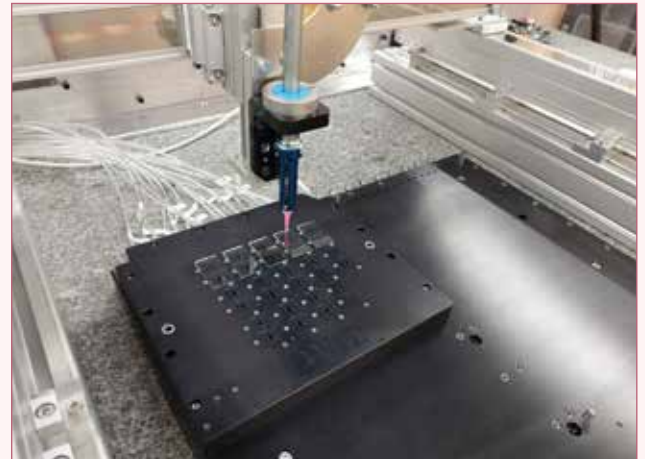
L'équipe est également très impliquée dans la détermination théorique de haute précision du moment magnétique anomal du muon, en combinant approches dispersives, données e^+e^- en hadrons, spectres de désintégration du tau et calculs de QCD sur réseau au sein d'une méthode hybride lattice–dispersive. Cette activité, menée dans le cadre de la collaboration DHMZ et de la Muon $g-2$ Theory Initiative, conduit aujourd'hui à l'une des prédictions les plus précises de la contribution hadronique au $g-2$ du muon, tout en développant une nouvelle mesure de sections efficaces avec BaBar qui clarifie les tensions expérimentales.

ATLAS HGTD - un Détecteur Hautement Granulaire pour une mesure de Temps d'une extrême précision

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 avant du détecteur. 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-rapidité de 2,4 à 4. Constitué de quatre couches de capteurs silicium de type LGAD (Low Gain Avalanche Detector), une résolution en temps de l'ordre de 30 à 50 picosecondes par cellule sera nécessaire pour associer les hits aux particules des collisions proton-proton. L'équipe HGTD du LPNHE participe au développement d'algorithmes de reconstruction des traces et à l'optimisation des performances du détecteur. Afin d'atténuer les effets d'empilement, HGTD doit associer correctement les temps mesurés aux objets physiques (traces ou vertex). Le groupe a travaillé sur l'amélioration des performances d'association temps/trace en termes de pureté et d'efficacité avec le développement et l'implémentation d'un algorithme dédié.



Une partie de l'équipe HGTD mettant en œuvre l'automate d'assemblage des unités HGTD et opérant le banc de tests électriques de contrôle des modules.



Vue du robot de collage des modules HGTD sur les supports en cours de tests. Des dépôts de colle sont effectués sur des plaques de verre pour sa mise au point.

Depuis 2016, la collaboration HGTD mène des campagnes de faisceaux test au SPS du CERN et à DESY afin d'étudier les performances des capteurs LGAD. Le LPNHE a participé à plusieurs campagnes de tests en faisceaux et l'analyse des données obtenues a été une activité majeure au cours des dernières années et va se poursuivre dans les trois ans à venir. Huit articles JINST et NIM auxquels le groupe du LPNHE a contribué ont été publiés.

Enfin, le LPNHE est maître d'œuvre de la conception et de la réalisation des unités de détecteur HGTD. À ce stade, la conception du détecteur est finalisée, plusieurs prototypes ont été produits et un premier démonstrateur a été construit. 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 2026. Au cours des dernières années et jusqu'en 2025, une intense activité de R&D a été menée au LPNHE. Les 48 dessins des supports issus des modèles CAO 3D ont été produits. De nombreux prototypes ont été fabriqués au laboratoire et sous-traités à des entreprises françaises et chinoises.

La seconde activité technique du groupe concerne la fabrication des unités de détecteur, constituées des modules collés sur les structures de support précédemment décrites. Nous avons en charge la

conception et la mise au point de la procédure. De nombreuses études ont été menées afin d'établir la procédure d'assemblage. 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.

CHIFFRES CLEFS

8032 modules pour l'ensemble du détecteur HGTD.

3 614 400 voies de lectures HGTD.

Les deux démonstrateurs HGTD comporteront **41 000** 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 **184** unités de détection seront fabriqués au LPNHE.

Au cours des années à venir, les activités HGTD du LPNHE vont s'inscrire dans la continuité des différents domaines auxquels le groupe contribue depuis le début du projet. Jusqu'en 2027, le LPNHE devra assurer ses engagements concernant la production des unités de détecteur tels que prévus par le MoU signé par l'IN2P3.

Dans un premier temps, la préproduction des unités de détecteur, 24 unités composant le module-0 équivalent à un quadrant, est prévue début 2026. La production devrait débuter dans la seconde moitié de 2026.

Chercheuses et chercheurs :

Tristan Beau, Didier Lacour, Iréna Nikolic, Sophie Trincaz Duvold

Équipe technique :

Sébastien Colinot, Jean-Marc Colley, Guillaume Daubard, Marc Dhellot, Alexandre Lantheaume, Didier Laporte, Adama Sylla

Doctorantes et doctorants :

Chloé Pénélaud

ATLAS ITk - Construction d'un trajectographe de nouvelle génération

La haute luminosité du LHC : un défi pour les détecteurs

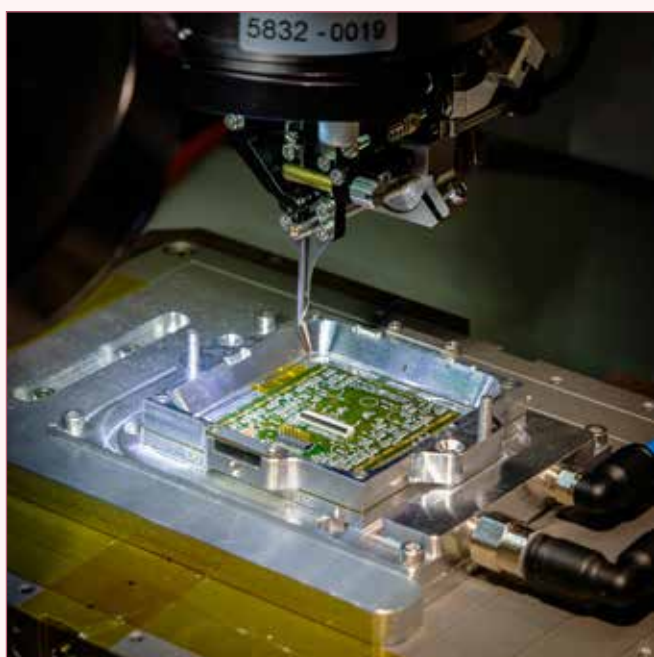
À partir de 2029, le HL-LHC fournira à ATLAS et CMS une luminosité 5 à 7,5 fois supérieure à celle de l'actuel LHC, pour un ensemble de données de 3 à 4 000 fb⁻¹, dix fois plus qu'avant la phase HL-LHC. Cette amélioration offrira des conditions uniques pour approfondir l'étude du boson de Higgs et élargir la recherche de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard. Cette forte hausse

de luminosité entraînera environ 200 collisions par croisement, soit cinq fois le niveau actuel, ainsi qu'un flux de radiation pouvant atteindre $1-2 \times 10^{16}$ n_{eq}/cm², vingt fois supérieur à celui supporté par le trajectographe présent. Les détecteurs devront donc fonctionner dans un environnement beaucoup plus exigeant, rendant l'actuel trajectographe d'ATLAS obsolète et nécessitant une conception entièrement nouvelle. Le groupe ATLAS du LPNHE travaille depuis longtemps au développement des capteurs du nouvel ITk et a débuté en 2024 l'assemblage des modules.

En parallèle, en collaboration avec l'ITk et des différents programmes internationaux, parfois reorganisés dans les groupes de R&T de l'ECFA (RD50, RD53, DRD3/7/8, AIDAInnova), il poursuit le développement de technologies avancées pour les futurs détecteurs au silicium : capteurs LGAD à pixels, solutions de refroidissement par micro-canaux en silicium ou fibres de carbone, ainsi que nouvelles techniques d'interconnexion entre capteurs et électronique frontale.

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

Depuis plus de dix ans, le groupe ATLAS du LPNHE développe une expertise reconnue dans les capteurs à pixels en silicium. Avec l'IJCLab et le MPP de Munich, il a proposé la technologie n-in-p, plus simple et économique que le n-in-n utilisé dans l'actuel trajectographe d'ATLAS. Après plusieurs validations menées au laboratoire, cette technologie a été choisie pour ITk, ouvrant la voie à la production de capteurs n-in-p. Le groupe a également joué un rôle clé dans la mise au point de capteurs minces, mieux adaptés aux fortes fluences du HL-LHC grâce à une réduction du piégeage de charge. Des géométries optimisées pour ces capteurs minces ont été développées au LPNHE,



Connexion des modules flex aux puces de front end par des fils de 25 μm : le wire bonding.



Préparation d'un module nu pour une caractérisation sur la machine de métrologie.

notamment pour améliorer l'efficacité en bordure. En collaboration avec la fonderie FBK (Trento), plusieurs générations de capteurs ont été produites avec des épaisseurs de 150, 100 et 50 μm . Testés au laboratoire et sur faisceau, avant et après irradiation, ils atteignent plus de 97 % d'efficacité après la fluence attendue au HL-LHC, répondant pleinement aux exigences d'ATLAS. FBK est désormais qualifiée pour la production des capteurs de 100 μm , utilisés dans la première couche planaire (Layer-1). Le groupe du LPNHE a aussi contribué à la qualification d'autres fonderies pour les capteurs de 150 μm à travers des tests en faisceaux et des campagnes d'irradiation. Le LPNHE joue un rôle majeur dans la construction française des modules du trajectographe ITk, au sein d'un regroupement avec l'IJCLab et le CEA/IRFU créé en 2019. Ce consortium est en train de produire 33 % des modules du tonneau externe, soit environ 2100 unités, accompagnées d'un contrôle qualité complet. Le laboratoire a renforcé ses infrastructures : installa-

tion d'une nouvelle machine à bonder, équipements de métrologie, microscope haute résolution et système à rayons X pour tester les interconnexions. Les équipes techniques ont rapidement acquis l'expérience nécessaire pour exploiter cette instrumentation. Une seconde station de tests sous pointes,

financée par l'IN2P3 et Sorbonne Université est utilisé dans le cadre de la plateforme CLAP pour le contrôle qualité des capteurs et des modules nus issus des fonderies. La validation des modules demande un large programme de tests électriques, thermiques et mécaniques.

CHIFFRES CLEFS

700 fils par module, avec une taille de pixel de 50x50 μm et une épaisseur du senseur de 150 μm .

2 100 modules à construire dans le cluster Parisien, **700** au LPNHE.

9 modules produits par semaine au LPNHE en moyenne.

Chercheuses et chercheurs :

Stéphanie Beauceron, Giovanni Calderini, Reina Camacho Toro, Francesco Crescioli, Frédéric Derue, Bertrand Laforge, Yahya Khwaira, Luka Selem

Équipe technique :

Nikita Bogatyrev, Pascal Corona, Marc Dhellot, Cyrille Goulet, Yann Orain, Jean-Pascal Rivierre

Doctorantes et doctorants :

Thiziri Amezza, Paul Chabrilat

Etudes de performances e/ γ et assurance qualité des données

Avec l'augmentation de la luminosité du LHC, les expériences doivent relever deux défis majeurs : préserver la qualité des mesures malgré le nombre croissant de collisions simultanées et améliorer la maîtrise des effets systématiques qui limitent désormais la précision des analyses, même lorsque les statistiques augmentent. Ces enjeux dépendent directement de la vérification de la qualité des données enregistrées à chaque remplissage du LHC, travail auquel notre groupe contribue activement depuis 2024, en particulier pour les électrons, photons, jets, taus et l'énergie transverse manquante.

Notre équipe joue un rôle régulier dans l'amélioration de la reconstruction des données d'ATLAS. En 2024-2025, elle a contribué à l'évolution du système de déclenchement des électrons et photons, ainsi qu'à l'amélioration de la mesure du temps d'arrivée des particules dans le calorimètre électromagnétique. Une méthode innovante fondée sur la structure des amas d'énergie a montré qu'elle pouvait simultanément affiner la reconstruction temporelle et réduire l'impact de l'empilement, permettant d'envisager l'utilisation accrue du calorimètre central pour le choix du vertex et la mesure du temps de vol de particules se désintégrant loin du point d'interaction

— un atout pour la recherche de matière noire à longue durée de vie.

Notre groupe a également développé deux avancées clés pour les analyses du *Run 3* : l'identification de paires boostées de particules électromagnétiques grâce à des asymétries dans la forme des gerbes et la possibilité d'en mesurer l'isolement. Ces asymétries améliorent la discrimination contre les pions neutres, les photons convertis ou tardifs, et ouvrent la voie à une sélection plus efficace des photons boostés. Nous avons en parallèle conçu une approche de *machine learning* exploitant finement la morphologie des gerbes, surpassant les méthodes précédentes. Enfin, nous avons démontré que ces asymétries permettent d'identifier des paires de photons issues de la désintégration de particules ALP de longue durée de vie et d'en déduire leur masse.

Chercheuses et chercheurs :

Bertrand Laforge, José Ocariz, Edmar Purcino de Souza

Doctorantes et doctorants :

Artur Cordeiro Oudot Choi, Romain Van Den Broucke, Frédéric Dejean

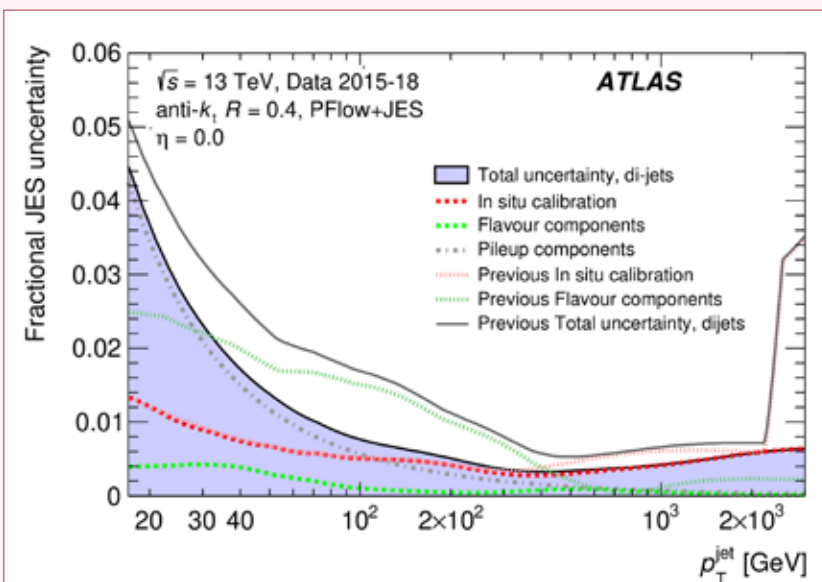
Des jets partout au LHC : études de physique, calibration et étiquetage des jets

Les jets, gerbes de particules issues de quarks ou gluons, sont essentiels au LHC pour tester la Chromodynamique Quantique (QCD), sonder la structure du proton et rechercher de nouvelles physiques aux échelles les plus petites accessibles en laboratoire. Ils constituent aussi un ingrédient central de nombreuses analyses de physique et donc leur étude est indispensable pour garantir la fiabilité des résultats expérimentaux.

Le groupe a poursuivi ses contributions majeures à la calibration des jets dans trois efforts différents : la méthode in-situ de la balance de deux jets, celle fondée sur le rapport E/p pour des traces isolées et la calibration d'énergie et masses des jets issues des bosons de Higgs se désintégrant en b-quarks en utilisant des processus comme $V+\gamma$ et $V+\text{jets}$ (avec $V=W,Z$). Durant la période couverte par ce rapport, les résultats de la méthode E/p sont devenus publics, montrant une réduction importante des incertitudes systématiques sur tout l'espace de phases de la calibration. Pour la première fois, la combinaison des méthodes in-situ et E/p a été réalisée, prouvant leur compatibilité et propageant les corrélations

d'incertitudes. Ces calibrations sont désormais intégrées aux analyses ATLAS de sections efficaces de production de jets, domaine dans lequel le groupe joue un rôle de principal, exploitant l'ensemble des 140 fb^{-1} de données du *Run 2* à 13 TeV.

Des membres de l'équipe développent des techniques avancées d'étiquetage de jets de bosons W, top et Higgs à l'aide de la méthode du Lund Jet Plane (LJP). Ils travaillent aussi à la calibration des Higgs boostés ($H \rightarrow b\bar{b}$) à partir des processus $Z+\text{jets}$ et $Z+\text{photon}$ dans le cadre d'un projet de collaboration international IEA. L'utilisation du LJP afin d'évaluer la constante de couplage de l'interaction forte fait aussi partie du travail du groupe pour fournir un éclairage unique sur la QCD, ainsi que sur la physique potentielle au-delà du Modèle Standard. Ce travail est mené sur les données du *Run 2* et étendu à des études prospectives pour le FCC-ee, dans le cadre d'un projet ANR jeune chercheur. Le groupe contribue aussi à la mesure de précision de la masse du boson W, en particulier en réduisant la dépendance de modèle de celle-ci, par la mesure expérimentale de la distribution de p_T du boson W.



Incertitude relative à l'énergie du jet en utilisant la méthode E/p , montrant une réduction importante des incertitudes systématiques sur tout l'espace de phases de l'étalonnage par rapport aux résultats précédents.

Chercheuses et chercheurs :

Reina Camacho Toro, Bogdan Malaescu, Lata Panwar, Andres Pinto, Luc Poggioli, Melissa Ridel, Christophe Roland

Doctorantes et doctorants :

Thiziri Amezza, Line Delagrangé

CHIFFRES CLEFS

Calibration en énergie des jets, avec une précision meilleure que **0,5 %**

Physique du Quark Top

Le quark top est la particule élémentaire la plus massive observée à ce jour. Sa grande masse, d'environ $173 \text{ GeV}/c^2$, fait qu'il se comporte différemment des autres fermions et se désintègre avant de s'hadroniser. Il joue un rôle important dans les corrections de boucles aux ordres supérieurs des processus du Modèle Standard, ce qui fait de la masse du quark top (m_{top}) un paramètre crucial des tests de précision de la théorie électrofaible. Le groupe poursuit son programme de mesure de m_{top} en utilisant des désintégrations de quark top $t \rightarrow Wb$ où le quark b produit un méson $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$. La mesure est basée sur une méthode de patrons utilisant la sensibilité à m_{top} de la masse invariante $m(\ell\mu^+\mu^-)$ du système formé par le lepton ℓ issu du boson W et du $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$. Avec les données du Run 2, une mesure vient d'être publiée, $m_{top} = 172,17 \pm 0,80$ (stat) $\pm 0,81$ (syst) $\pm 1,07$ (recoil) GeV, avec une incertitude totale de 1,56 GeV. La troisième incertitude provient de la modélisation du recul des gluons dans les gerbes partoniques dans les désintégrations des quarks top. Outre cette incertitude dominante, les autres sources prin-

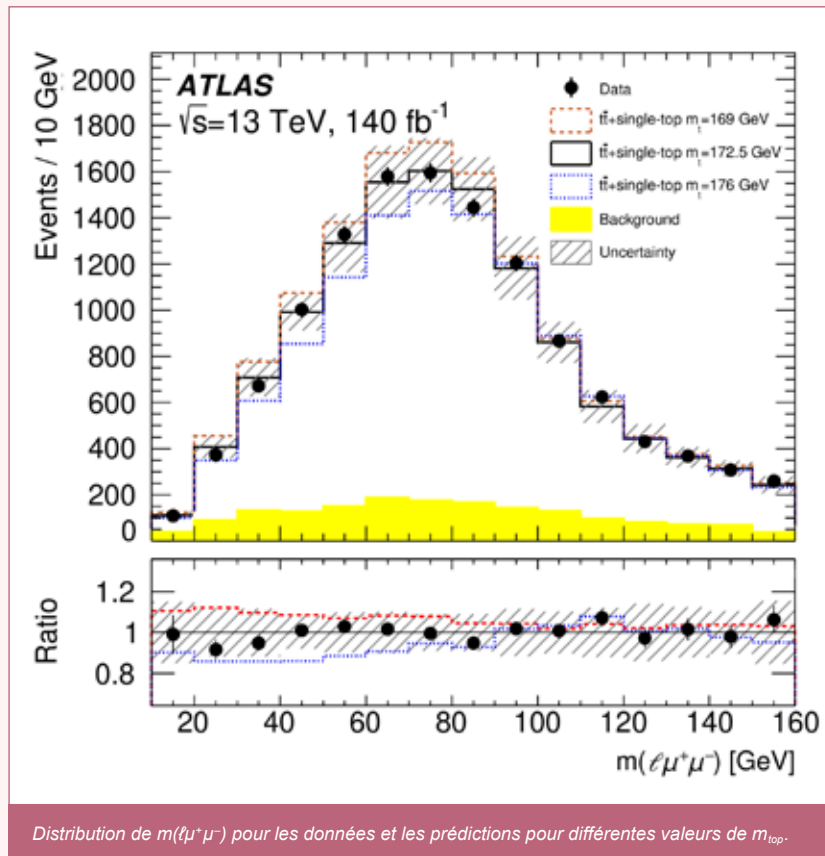
cipales d'incertitudes systématiques proviennent de la modélisation des phénomènes d'hadronisation et de fragmentation des quarks b. Au contraire, l'incertitude liée à la calibration en énergie des jets, dominante dans la plupart des autres mesures, est ici réduite à près de 100 MeV de part l'utilisation de leptons pour construire $m(\ell\mu^+\mu^-)$. Cette mesure a une incertitude statistique importante indiquant qu'une mesure utilisant un lot de données plus important pourra atteindre une meilleure précision. Une thèse vient de débiter pour une telle mesure avec les données du Run 3. Le groupe bénéficie pour ces études d'une collaboration avec Cracovie (IFJ-PAN) dans le cadre des accords de coopération IN2P3-COPIN et de séjours invités par l'Université Paris Cité.

Chercheuses et chercheurs :

Frédéric Derue, Stéphanie Beauceron

Doctorantes et doctorants :

William Roth



Physique du boson de Higgs

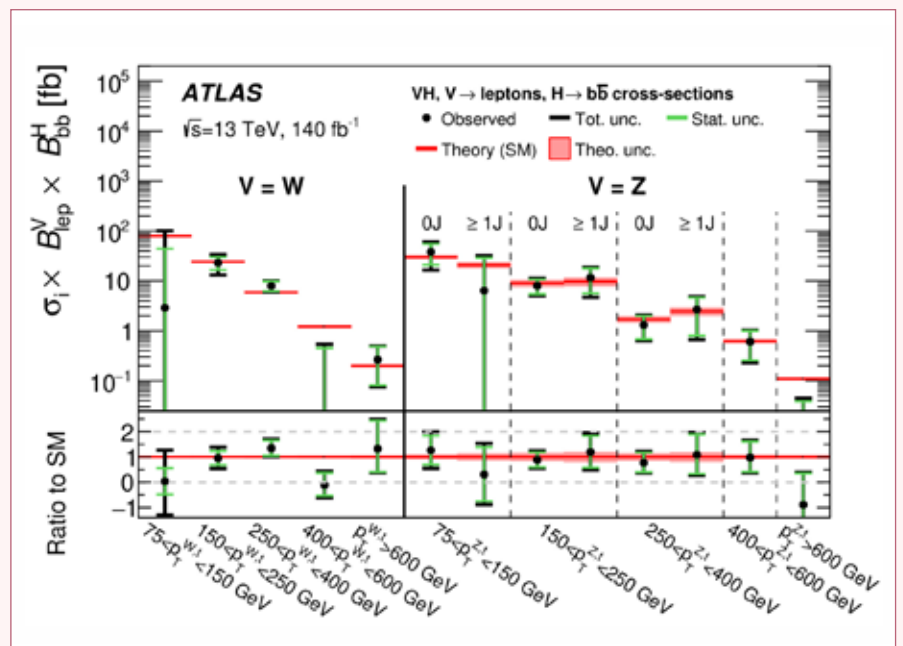
La découverte d'un boson scalaire compatible avec le boson de Higgs (H) du Modèle Standard (MS) constitue un succès expérimental majeur. L'étude de ses propriétés est essentielle pour comprendre la brisure de la symétrie électrofaible et vérifier la réalisation du mécanisme de Brout-Englert-Higgs (BEH) dans la nature. L'équipe a apporté des contributions clés aux analyses de découverte du boson de Higgs en 2012 et exploite les données collectées par l'expérience ATLAS aux *Runs* 2 (2015-2018) et 3 (2022-en cours) du LHC pour réaliser des mesures de précision de ses propriétés afin de mieux comprendre le mécanisme BEH et les limites du MS.

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 impulsion 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 $b\bar{b}$, avec un rapport d'embranchement de 58 %, est le canal sur lequel nous nous sommes concentrés.

En 2024 et 2025, l'équipe poursuit son implication dans l'étude de la production de paires de bosons de Higgs (HH), en particulier par fusion de bosons vecteurs (VBF). Ce processus rare, prévu par le MS, constitue un test fondamental de la théorie : il met en jeu les interactions HHH, VVH et VVHH (avec $V=W,Z$) et révèle une annulation subtile entre amplitudes impliquant des bosons vecteurs longitudinalement polarisés, signature directe de la structure en doublet du champ

de Higgs postulée par le mécanisme BEH. L'équipe explore le canal $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$, en exploitant les données Run 2 et Run 3 de l'expérience ATLAS, et se concentre sur le régime de masse élevée, où la sensibilité est maximale et les techniques de sous-structure de jets indispensables. On développe la première interprétation de cette analyse en termes de théorie effective des champs. Ces recherches s'inscrivent dans un projet collaboratif IJCLab-LPNHE-CPPM, soutenu par l'ANR depuis le début de 2023, pour exploiter pleinement le potentiel scientifique des données du LHC.

En parallèle, l'équipe a contribué à la mesure de $H \rightarrow b\bar{b}$ et recherche de $H \rightarrow c\bar{c}$, où le boson de Higgs est produit en association avec un boson W ou Z, en utilisant 140 fb^{-1} de données enregistrées par ATLAS pendant le *Run* 2. Cette étude publiée en 2025 combine les régimes résolu, où les deux jets b sont séparés, et boosté, où le boson de Higgs est reconstruit à l'aide de jets à grand rayon et identifiés à l'aide de techniques de sous-structure de jet. Des catégories basées sur l'étiquetage b/c et la cinématique permettent d'extraire les sections efficaces différentielles en fonction du moment trans-



Les sections efficaces VH mesurées pour différentes régions dans l'impulsion transverse.

verse du boson. L'observation des canaux WH et ZH avec $H \rightarrow b\bar{b}$ atteint 5,3 et 4,9 écarts-types (σ) respectivement. Une limite à 95 % CL sur $H \rightarrow c\bar{c}$ est fixée à environ 11,5 fois la prédiction du MS.

CHIFFRES CLEFS

Nombre attendu d'événements HH produits dans le *Run 2* et *Run 3* au LHC : environ **8000**

Les résultats à très haut p_T (au delà de 600 GeV) étendent la portée de la mesure dans un domaine cinématique très peu exploré et très sensible à la nouvelle physique.

Chercheuses et chercheurs :

Giovanni Calderini, Reina Camacho Toro, Christophe Roland

Doctorantes et doctorants :

Thiziri Amezza

Recherche de formes exotiques de matière noire

La recherche de la matière noire repose aujourd'hui sur trois approches complémentaires : sa détection directe, où l'on tente d'observer ses interactions rares avec la matière ordinaire ; sa détection indirecte, fondée sur la recherche de ses produits d'annihilation dans les rayons cosmiques ; et sa production explicite dans les accélérateurs de particules comme le Large Hadron Collider (LHC) du CERN.

Longtemps, on a essayé d'associer la matière noire à la physique électrofaible, en particulier à des particules de type WIMP prédites naturellement par des théories supersymétriques par exemple, car la densité relique observée pouvait correspondre à des sections efficaces typiques de l'interaction faible à son énergie caractéristique. Cependant, malgré plusieurs décennies de recherches, aucune preuve expérimentale n'a été obtenue. Ce constat a conduit à diversifier les recherches de candidats de masses très variées, voire à vérifier si des objets astrophysiques comme les trous noirs primordiaux pouvaient constituer une fraction notable de la matière noire.

Cette diversification impose d'explorer des signatures inédites et de repenser les techniques de détection et de reconstruction des événements.

Certains modèles prédisent la production de particules de longue durée de vie (LLP) susceptibles d'échapper aux algorithmes standard. D'autres donnent au boson de Higgs, découvert en 2012, un rôle de portail entre le secteur visible et le secteur sombre contenant les particules de matière noire. Ces scénarios incluent notamment des particules de type axion (ALP), pouvant se désintégrer en deux photons, de manière prompte ou différée selon leur durée de vie (LL-ALP).

L'un des canaux privilégiés consiste à étudier la production de paires de photons issues de résonances exotiques se désintégrant au point d'interaction ou à distance de ce dernier. Notre équipe, impliquée dans la découverte du boson de Higgs dans le canal diphoton durant le *Run 1*, s'est orientée vers la recherche de telles signatures. Au *Run 2*, elle a contribué à la recherche de résonances diphoton sur une large gamme de masses, puis à la mise au point d'une stratégie innovante basée sur la détection de paires de photons fortement boostées, permettant d'exclure l'existence de résonances légères avec des masses d'environ $5 \text{ GeV}/c^2$ au minimum. Ce travail s'appuie sur une amélioration des critères d'isolation calorimétrique des photons, optimisés à partir des données expérimentales.

Les études actuelles menées avec les données du *Run 3* visent à affiner ces corrections, à estimer les incertitudes systématiques entre données et simulations, et à développer de nouveaux critères adaptés aux photons collimatés afin d'accroître la sensibilité aux particules légères de type axion ou à des LL-ALP. Ces travaux s'inscrivent dans deux collaborations majeures : un projet COFECUB avec le cluster ATLAS du Brésil, dédié à l'optimisation du déclenchement d'ATLAS et à l'application de l'apprentissage automatique aux différents challenge de ces analyses; et un projet ANR associant le LPSC, le LPNHE et le LPTHE, centré sur la recherche de particules de longue durée de vie. Ce dernier vise également à améliorer la réinterprétation des analyses du LHC grâce à *MadAnalysis5*, enrichi d'un

module de simulation rapide basé sur l'intelligence artificielle générative.

Ainsi, par la combinaison d'innovations expérimentales, d'approches théoriques renouvelées et d'une forte dynamique collaborative, ce programme contribue activement à la diversification et à la modernisation de la recherche de matière noire au LHC.

Chercheuses et chercheurs :

Bertrand Laforge, José Ocariz, Edmar Purcino de Souza

Doctorantes et doctorants :

Artur Cordeiro Oudot Choi, Romain Van Den Broucke, Frédéric Dejean

Prospectives pour la physique au FCC-ee

Le FCC-ee offrira des conditions particulièrement intéressantes pour des études de physique de précision, en particulier celles impliquant des jets, grâce à l'environnement "propre" des collisions e^+e^- et à la haute luminosité disponible. En effet, l'étude des taux de production des jets et de leur sous-structure permettra de tester la QCD et rechercher des possibles signaux de nouvelle physique. Nous travaillons pour explorer les perspectives d'effectuer des études de QCD au FCC-ee, avec différentes options pour les technologies de détecteurs. Dans ce contexte, la reconstruction de la sous-structure des jets, que nous effectuons utilisant la méthode du LJP, fournit des contraintes importantes sur la résolution en énergie et la granularité du calorimètre, ainsi que sur le trajectographe. Nous étudions les possibilités d'extraction de la constante de couplage fort (α_S) et le test de sa dépendance en fonction de l'énergie utilisant le LJP, ainsi que le rapport des sections efficace de production des événements dijet et trijet ($R_{3/2}$). Ces études sont effectuées utilisant des simulations produites pour des détecteurs envisagés au FCC-ee. En particulier, cela a permis le développement d'une collaboration avec des chercheurs des universités UFBA et UFRJ

du Brésil, pour l'utilisation du simulateur Monte Carlo *Lorenzetti*, dans ce contexte. Dans ce but, une interface entre cet outil et la géométrie du détecteur IDEA a été implémentée. Le groupe a aussi mené une série d'études utilisant pour la première fois les observables LJP pour l'étiquetage et l'étalonnage d'objets électromagnétiques. Pour cette étude, un étudiant en stage de master a également travaillé dans le groupe pendant trois mois.

Depuis la proposition initiale des usines e^+e^- de haute luminosité à l'échelle électrofaible en 2011 (LEP3, TLEP, FCC-ee) l'équipe FCC du LPNHE a pu jouer un rôle moteur dans leur étude, tant au niveau de l'accélérateur qu'au niveau de la physique et plus généralement du management. Pour la définition de la "Stratégie européenne pour la physique des particules (ESPPU)", l'équipe a contribué en particulier aux études comparatives des propositions e^+e^- , en particulier en insistant sur le rôle de découverte important de l'usine à Z :

1) les mesures de précision électrofaibles grâce à la haute statistique et la précision de détermination de l'énergie dans le centre de masse pour les machines circulaires ;

2) et la découverte directe de particules au couplage superfaible, dont les neutrinos droits (ou stériles) sont l'exemple le plus évident. Il a aussi contribué à établir la liste des exigences expérimentales pour les détecteurs, de façon concrète.

Nous avons participé à la rédaction de plusieurs notes pour la contribution française à l'ESPPU, liées aux études des jets au FCC-ee, ainsi qu'au projet FCC-ee en général. Un poster que l'étudiante et la post-doctorante du groupe ont présenté lors du "Third 3rd ECFA workshop on e⁺e⁻ Higgs, Electroweak and Top Factories", sur les études des jets au FCC-ee, a reçu le 1^{er} prix pour la physique, reconnaissant la qualité de ce travail. Ces résultats montrent le dynamisme du travail effectué au LPNHE sur les perspectives pour le FCC-ee, travail soutenu aussi en partie par un projet ANR. Le LPNHE a été fortement impliqué dans l'organisation du "Symposium national - Préparation de la contribution de la communauté française à ESPPU" ayant eu lieu à Sorbonne Université et dans la co-organisation d'un workshop FCC-France. Nous avons également eu une participation importante aux workshops ECFA à Paris et Venise. Le programme de R&T pour les futurs collisionneurs nécessite des solutions innovantes dans de nombreux domaines. Le groupe LPNHE développe des pixels en silicium avec une couche de multiplication et une implantation de compensation afin d'obtenir des performances optimales en suivi spatial et temporel, fournissant des coordonnées 4D pour les points de l'espace (LGADs). L'implantation optimisée de dopages de signe opposé permettra d'obtenir une résistance aux radiations qui n'est pas disponible dans les capteurs LGAD actuels. Le développement de techniques innovantes d'interconnexion à l'électronique frontale, basées sur des films et pâtes conducteurs,

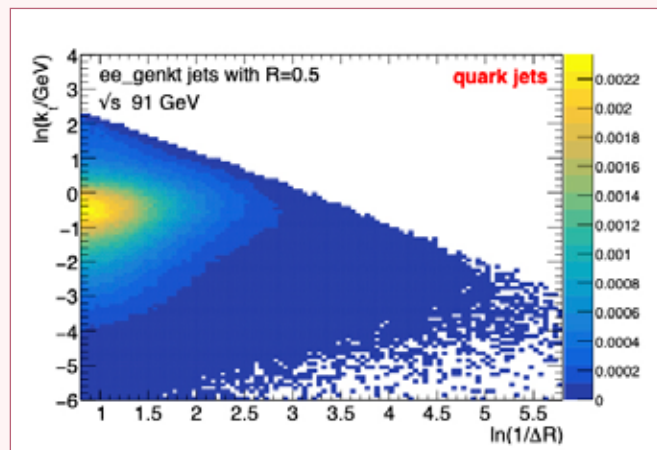
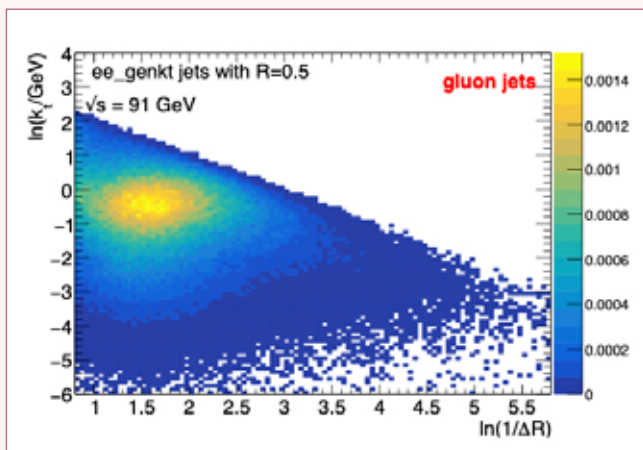
constitue un domaine dans lequel le groupe LPNHE joue un rôle de premier plan. Cela permettra d'accélérer le temps de R&T tout en réduisant les coûts et le temps de caractérisation. Pour les détecteurs à pixels destinés aux futurs accélérateurs hadroniques, l'uniformité du refroidissement sera également extrêmement importante pour éliminer le risque de runaway thermique, qui peut se déclencher dans les régions du capteur où le refroidissement est moins efficace. Un système de micro-canaux gravés dans des plaquettes de silicium ou un support local basé sur des micro-tubes en fibre de carbone, utilisés pour la circulation du CO₂ et connectés aux modules, permettra de réduire la quantité de matière du système, d'avoir une plus grande surface disponible pour l'échange thermique par rapport aux tuyaux classiques, et d'assurer le même coefficient de dilatation entre le bloc de refroidissement et le module, tout en éliminant les problèmes liés à la dilatation thermique. Grâce au projet AIDAInnova (2021-2025) et dans l'espoir de l'approbation de sa suite, Otello, ainsi que grâce au soutien de l'IN2P3, le groupe continuera le développement des capteurs LGAD, des interconnexions avec films/pâtes conducteurs et des systèmes de micro-canaux pour le refroidissement des dispositifs de détection de traces. Un certain nombre de résultats déjà obtenus sont disponibles dans les rapports d'AIDAInnova pour la communauté européenne : <https://aidainnova.web.cern.ch/>

Chercheuses et chercheurs :

Alain Blondel, Giovanni Calderini, Bogdan Malaescu, Lata Panwar, Luc Poggioli

Doctorantes et doctorants :

Line Delagrangé



Figures illustrant le potentiel d'étiquetage des jets originant de quarks ou gluons, utilisant la méthode de LJP, pour le détecteur IDEA.

Le g-2 du muon: signal ou contrainte pour la Nouvelle Physique ?

Le résultat final de l'expérience de Fermilab mesurant le moment magnétique anomal du muon (α_μ) utilise l'ensemble de la statistique accumulée pendant la prise de données et a atteint une précision remarquable de 124 ppb (parties par milliard). Cela fait de α_μ une des quantités les plus précises jamais mesurées et fournit un grand défi pour la prédiction théorique.

Pour cette dernière, l'incertitude dominante provient de la polarisation hadronique du vide (HVP), qui implique des effets non-perturbatifs. Une approche dispersive permet de calculer cette contribution, utilisant des données de précision des sections efficaces $e^+e^- \rightarrow$ hadrons. L'équipe "DHMZ", dont on fait partie, joue un rôle de leader dans la combinaison des spectres hadroniques mesurés par différentes expériences, pour la prédiction théorique du g-2 du muon. Par contre, les tensions présentes actuellement entre les mesures du canal dominant $\pi^+\pi^-$ empêchent la détermination d'une valeur théorique unique utilisant l'ensemble de ces données. Ceci-étant, nos mesures des effets radiatifs ont mis en évidence des limitations pour certains générateurs Monte Carlo, ce qui pourrait permettre d'améliorer les mesures de sections efficaces qui s'appuient le plus sur de telles simulations. Les mesures de spectres des désintégrations hadroniques du lepton tau sont en bon accord entre elles. Nous avons corrigé celles-ci pour des effets de la brisure de la symétrie d'isospin, ce qui rend possible leur utilisation pour déterminer une prédiction cohérente de la contribution HVP au g-2 du muon. Une autre approche pour calculer la contribution HVP utilise des simulations de QCD sur réseau. Dans ce cadre, les déterminations effectuées par différentes collaborations sont en bon accord, ce qui rend possible leur combinaison. Le résultat de QCD sur réseau et celui utilisant les données tau ont des précisions similaires et sont en bon accord. Dans une méthode hybride, fruit d'une collaboration entre des chercheurs d'IJCLab, du LPNHE et de la collaboration BMW (en particulier des collègues du CPT de Marseille), nous avons combiné un calcul sur réseau (BMW) avec une approche dispersive (DMZ). Cette dernière utilise les données expérimentales seulement dans la région de basse énergie, où les différentes mesures sont en bon accord entre elles (ainsi qu'avec le calcul de *lattice* QCD). Pour cela, on a effectué des combinaisons

de mesures obtenues par plusieurs expériences, avec un traitement complet de leurs incertitudes et corrélations. Le fait d'avoir employé la méthode dispersive pour des contributions de basse énergie a permis d'améliorer le résultat de *lattice* QCD d'une manière significative. Cela donne la prédiction la plus précise disponible de nos jours, qui est en bon accord et plus précise que celle utilisant seulement la moyenne des valeurs obtenues sur réseau, retenue comme « nominale » par la Theory Initiative dans son rapport d'étape.

Dans ce contexte, une étude qui a représenté une recherche indirecte pour des possibles signaux de Nouvelle Physique, apporte actuellement des contraintes fortes sur de telles contributions.

Un point important que nous avons soulevé dans ce contexte est le fait que les incertitudes systématiques expérimentales et leurs corrélations (entre les différentes composantes des incertitudes, ainsi qu'entre les différentes régions de l'espace des phases) ne sont pas connues parfaitement, mais seulement estimées. Ceci est un aspect que nous avons bien compris dans le contexte de certaines études ATLAS et qu'on a fait connaître à la communauté travaillant sur les prédictions théoriques pour g-2. En effet, les tensions entre certains lots de données des sections efficaces $e^+e^- \rightarrow$ hadrons, ainsi que la façon dont les incertitudes systématiques correspondantes sont évaluées, mettent clairement en évidence le fait que les incertitudes expérimentales et leurs corrélations ne sont pas connues parfaitement. Il est important de prendre en compte cet aspect dans les méthodes de combinaison de données, ainsi que lorsque des ajustements par des fonctions sont effectués, afin d'éviter que la précision des résultats ne soit trop optimiste. Ceci est effectivement pris en compte dans nos études.

Des travaux effectués à l'IJCLab et au LPNHE, pour une mesure indépendante de la section efficace $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-(\gamma)$, utilisant les données de BaBar, vont apporter des éclaircissements importants sur la situation des tensions expérimentales dans ce canal. Cette mesure de section efficace utilise une approche originale, qui n'emploie pas le détecteur pour effectuer l'identification des particules. En effet, cette méthode

utilise plutôt les différences cinématiques des canaux $\pi^+\pi^-$, K^+K^- et $\mu^+\mu^-$ pour la séparation des états finaux. Elle va permettre d'obtenir une nouvelle mesure, effectuée avec 8 fois plus d'événements que la mesure précédente, ainsi qu'avec des incertitudes systématiques réduites. Nous avons présenté un résultat préliminaire de cette mesure à des conférences internationales et deux publications sont en préparation.

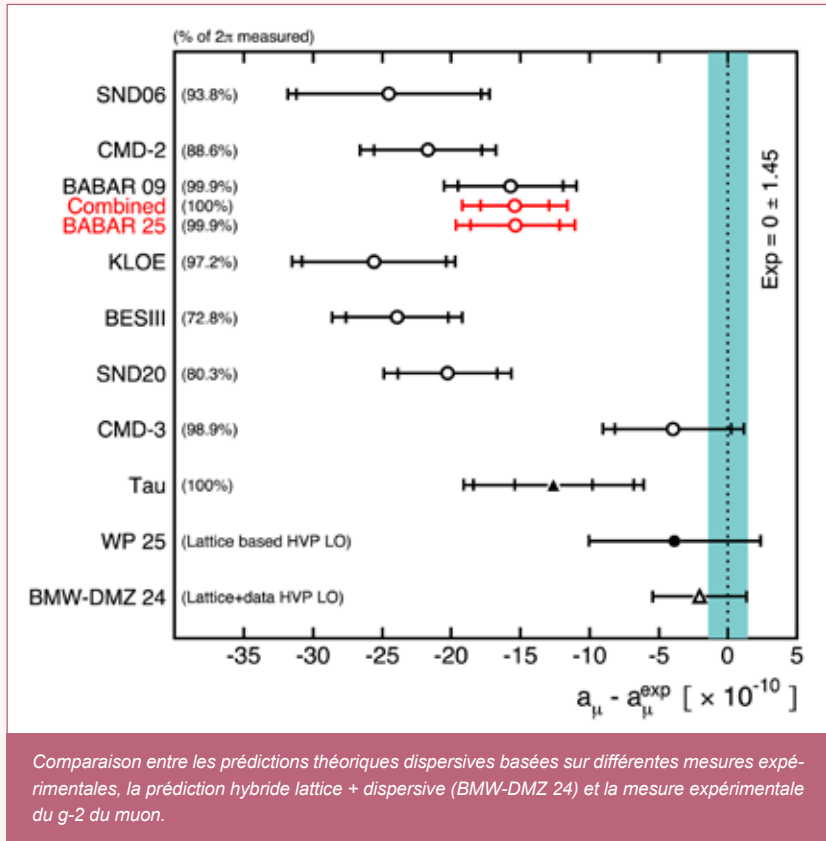
Dans ce cadre également, nous avons participé à la rédaction d'une note pour la contribution française à la "Stratégie Européenne pour la physique des particules (ESPPU)", sur le sujet de l'étude de la polarisation hadronique du vide, dont nous avons initié et coordonné la préparation.

Chercheuses et chercheurs :

Bogdan Malaescu, Andres Pinto, Leonard Polat

CHIFFRES CLEFS

Prédiction théorique hybride lattice + dispersive avec une précision de **320 ppb**
 Mesure expérimentale du g-2 du muon avec une précision de **124 ppb**



Activités de *machine learning* pour la simulation et l'analyse



Photo des participants au workshop ML4Jets se déroulant au LPNHE.

L'apprentissage automatique est devenu un outil central en physique des hautes énergies, et notre groupe a développé ces deux dernières années de nouvelles approches à tous les niveaux de la chaîne de traitement : simulation rapide, calibration avancée et analyses de données. Ces méthodes visent à améliorer la précision des outils existants et à permettre de nouvelles études, notamment via l'exploitation de données corrélées de grande dimension, la détection d'anomalies et des interprétations phénoménologiques plus fines.

Génération d'événements et simulation des détecteurs

Pour répondre aux besoins croissants en précision et en statistiques dans ATLAS, nous avons développé des méthodes de ML pour la simulation des jets, incluant des architectures de transformeurs pour la modélisation autorégressive des émissions multi-particules et des approches d'hadronisation itérative améliorant les prédictions de sous-structure avec une estimation fiable des incertitudes. En parallèle, le simulateur `Lorenzetti`, compatible avec différentes géométries `Geant4`, permet de produire des ensembles synthétiques de haute qualité à faible coût de calcul, ouvrant la voie à une meilleure simulation rapide des calorimètres. Une étude exploratoire de super-résolution a également montré le potentiel du *deep learning* pour améliorer la résolution du calorimètre électromagnétique ATLAS.

Analyse des données et phénoménologie

Le ML a été appliqué à de nombreuses tâches : identification de résonances diphotons promptes ou à longue durée de vie, amélioration des *triggers* en ligne pour électrons et photons grâce à une calibration affinée, étalonnage de l'énergie des jets et détection d'anomalies, y compris à partir de données générées via `Lorenzetti`. L'étiquetage d'objets boostés (*W*, *top*, *Higgs*) a été renforcé grâce à `LundNet`. Des techniques basées sur les données ont également permis de corriger les effets de diaphonie dans le calorimètre `LAr`, améliorant les résolutions en énergie et en temps.

Unfolding

Le groupe a réalisé des progrès importants dans l'*unfolding* basé sur le ML pour des observables de

grande dimension. Des méthodes génératives tenant compte des corrections d'acceptance et d'efficacité ont été développées, assurant une évaluation robuste des incertitudes. Une méthode basée sur les données, largement utilisée depuis plus d'une décennie, a été réexaminée afin d'étudier sa couverture statistique, notamment pour `lcINN`. Des comparaisons systématiques entre méthodes ont été menées et appliquées à la sous-structure des jets.



Une partie de l'équipe de machine learning au workshop *unfolding* à Berkeley.

Chercheuses et chercheurs :

Anja Butter, Reina Camacho Toro, Bertrand Laforge, Paulo Cesar Machado de Abreu Farias, Bogdan Malaescu, José Ocariz, Edmar Egidio Purcino de Souza

Doctorantes et doctorants :

Laura Boggia, Frédéric Dejean, Joaquín Iturriza Ramirez, Sebastian Pitz, Romain Van Den Broucke

Asymétrie Matière Anti-matière (AMA)

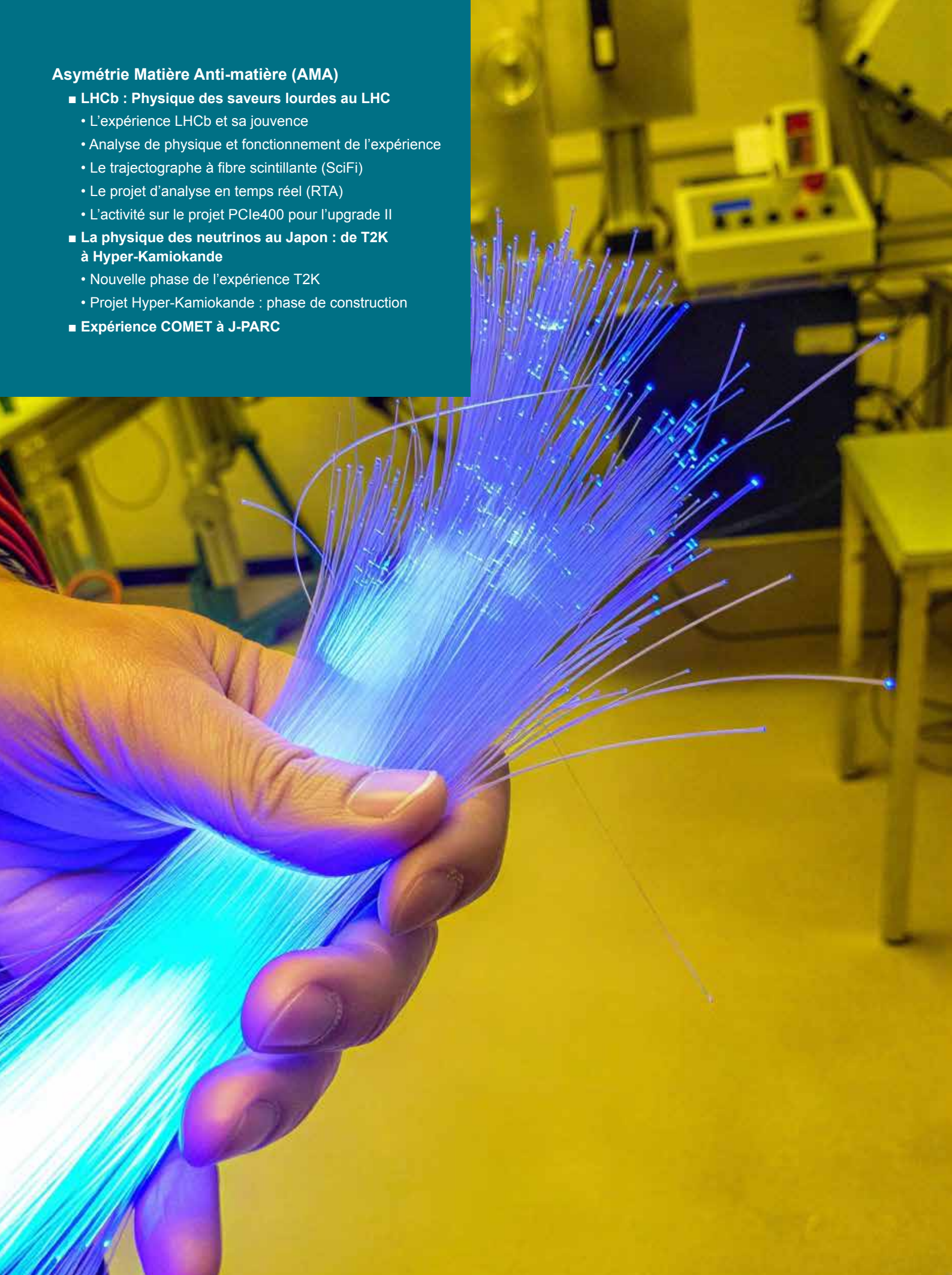
■ LHCb : Physique des saveurs lourdes au LHC

- 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)
- L'activité sur le projet PCIe400 pour l'upgrade II

■ La physique des neutrinos au Japon : de T2K à Hyper-Kamiokande

- Nouvelle phase de l'expérience T2K
- Projet Hyper-Kamiokande : phase de construction

■ Expérience COMET à J-PARC



Asymétrie Matière Anti-matière (AMA)

L'absence d'anti-matière dans notre Univers questionne directement la capacité du Modèle Standard de la physique des particules à en rendre compte. Une des conditions, postulées par A. Sakharov pour expliquer cette disparition de l'anti-matière, est l'existence de processus violant la symétrie CP (charge-parité), agissant donc différemment sur les particules et sur les anti-particules. L'interaction faible du Modèle Standard possède cette propriété intrinsèque, qui est liée au mélange des "saveurs" de quarks décrit par la matrice CKM (Cabibbo–Kobayashi–Maskawa). Pourtant, elle est insuffisante pour expliquer la disparition de l'anti-matière. Il faut donc rechercher au-delà du Modèle Standard. Les 3 groupes du LPNHE rassemblés dans la thématique AMA (Asymétrie Matière Anti-matière) - LHCb, Neutrino (T2K-HK), COMET - s'y attèlent dans des directions différentes.

L'expérience LHCb au CERN a justement produit des mesures dont certaines sont les plus précises de la matrice de mélange CKM. Après un renouvellement majeur du détecteur, auquel le groupe du LPNHE a fortement contribué, une nouvelle campagne de prises de données a débuté en 2022 et pour 5 ans, alimentant des analyses de physique focalisées sur la recherche d'événements rares, possibles signatures de nouvelle physique.

L'introduction de l'analyse en temps réel (RTA) dans le système de déclenchement est une révolution qui est un facteur déterminant dans la capacité du détecteur LHCb mis à niveau d'acquérir un nombre plus grand d'événement, exploitant la luminosité instantanée accrue du LHC. Ce projet, très largement piloté par le groupe du LPNHE, a bénéficié d'un ERC Starting Grant. Il a été délivré fin 2022, puis amélioré par l'ajout de cartes GPU pour un fonctionnement nominal dès 2024. Un travail sur des algorithmes de calcul parallèle pour la reconstruction des traces sur GPU a permis d'en améliorer l'efficacité et actuellement un autre développement sur la reconstruction des vertex se montre très prometteur grâce à l'utilisation des réseaux de neurones.

Une autre contribution significative à la jeunesse du détecteur a été la participation au remplacement du trajectographe par un autre à fibres scintillantes, pour lequel le groupe du LPNHE s'est impliqué dans l'élec-

tronique dite *Back-End*, en particulier au niveau de la production des micro-codes et des logiciels associés. Au-delà de cette étape, et en vue de la préparation à la haute luminosité (HL-LHC vers 2035), des développements sont engagés pour faire évoluer cette électronique : le groupe du LPNHE y contribue depuis 2025 avec d'autres groupes de l'IN2P3.

En ce qui concerne les contributions aux analyses de physique, le groupe explore 2 directions. La première étudie de possibles violations de l'universalité leptonique dans des canaux sensibles à des processus hors Modèle Standard : à titre d'exemple la mesure de l'universalité leptonique entre $B^{+(0)} \rightarrow K^{+(0)} \mu^+ \mu^-$ et $B^{+(0)} \rightarrow K^{+(0)} e^+ e^-$ est la plus sensible dans le secteur du méson B. La deuxième s'intéresse aux désintégrations sans charme des mésons B, pour en faire une analyse dépendante du temps. Cette étude passe par des étapes intermédiaires de plus en plus complexes : actuellement il s'agit de l'analyse en amplitude du mode $B^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$ dans le plan Dalitz.

L'expérience COMET, quant à elle, va étudier la possibilité de conversion de muons en électrons, violant ainsi la conservation de la saveur leptonique. Cette expérience, en développement au Japon sur le site de J-PARC, se déroulera en plusieurs phases: la première vise à la maîtrise complète du faisceau de muons (fin 2026), avant la phase d'exploitation proprement dite pour rechercher les conversions $\mu \rightarrow e$. Les contributions des groupes français portent sur les algorithmes de reconstruction des traces, la simulation et la maîtrise des bruits de fonds, et sur la logistique de calcul assurée par le CC-IN2P3.

L'expérience T2K aborde d'une tout autre manière l'étude de la violation de la symétrie CP : elle le fait en comparant des mesures précises d'oscillation de neutrinos et d'anti-neutrinos. Une violation de CP se manifesterait par une phase non nulle dans la matrice de mélange PMNS (Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata), analogue pour les neutrinos de la matrice CKM pour les quarks. Les résultats de la première phase de l'expérience T2K indiquent une possible violation maximale de CP mais à un degré de confiance limité par la statistique et les systématiques. Il a donc été décidé par la collaboration, d'une part de procéder à une jou-

venance importante du détecteur proche de T2K, contributeur majeur pour les incertitudes systématiques de cette mesure, et d'autre part de préparer activement la troisième génération d'expériences d'oscillation de neutrinos, HyperKamiokande (HK).

Le groupe a fortement contribué à la mise à jour du détecteur proche, complétée en 2024, à travers l'électronique de lecture des nouvelles chambres à projection temporelle et les logiciels de reconstruction, sans oublier la coordination de cet effort majeur de la collaboration. La contribution aux analyses et à la réduction des systématiques a porté, à nouveau, sur la maîtrise du faisceau de neutrinos à travers l'expérience ancillaire de production de hadrons, NA61/SHINE au CERN, sur un travail commun avec les théoriciens pour la compréhension et la modélisation des sections efficaces d'interaction, et sur le cadre d'analyse global (GUNDAM). Il faut noter par ailleurs que la collaboration a publié récemment deux analyses conjointes avec des expériences travaillant sur les mêmes sujets : avec Super-Kamiokande en 2024 et avec NOvA en 2025.

La prochaine génération d'expérience, HK, est maintenant réellement entrée dans la phase de construction. Le creusement de la gigantesque caverne près de Kamioka a été achevée fin juillet 2025 et la logistique de production des éléments du détecteur est lancée pour une installation qui commencera en 2027. La contribution instrumentale du groupe du LPNHE porte sur le système de distribution d'horloge. La base de temps, qui combine horloges atomiques et lien au temps universel via les systèmes satellitaires type GPS, a été testée avec succès au laboratoire. Pour la distribution, une carte électronique (TDM) a été conçue, testée et sera produite en 2026. Avec un calendrier très tendu, l'expérience devrait prendre ses premières données en 2028, mais on sait d'ores et déjà qu'une deuxième mise à jour du détecteur proche ND280 pourrait s'avérer nécessaire pour réduire encore plus certaines systématiques. Le groupe s'intéresse donc dès maintenant à une R&D sur des cubes scintillants novateurs, qui pourraient constituer la prochaine cible des neutrinos dans le détecteur proche.



LHCb : Physique des saveurs lourdes au LHC

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. Elle a pu effectuer, en particulier, les mesures les plus précises de la matrice de mélange des quarks (matrice CKM). Après une refonte majeure du détecteur (jouvence phase I), LHCb a lancé une nouvelle campagne de prise de données, avec un système de déclenchement entièrement logiciel rendant possible la prise de données à la même cadence que les croisements des faisceaux. Le détecteur LHCb rénové est conçu pour faire face à une forte augmentation de l'intensité des faisceaux et du nombre d'événements enregistrés, pour explorer plus loin 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, a été l'un des protagonistes de la conception et de la réalisation du nouveau système de déclenchement, et est depuis peu impliqué dans les développements techniques liés à la phase II de la jouvence de LHCb.

Les analyses de physique menées par le LPNHE se déploient principalement autour de deux axes, avec comme but la recherche de nouvelle physique : l'étude de l'universalité et de la violation de la saveur leptonique, utilisant surtout des désintégrations semi-leptoniques du type $b \rightarrow s \ell^+ \ell'^-$ (où ℓ' désigne un lepton chargé) et $b \rightarrow c \ell^- \nu$, et l'étude des désintégrations du méson B en états finals sans particule charmée. Le premier sujet s'inscrit dans un thème actuel phare de la physique des saveurs, avec plusieurs anomalies qui sont apparues et sont en train d'être explorées. À plus long terme, le second sujet se développe en plusieurs phases de complexité croissante, chacune donnant accès à un nombre croissant d'observables intéressantes.

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). Le système utilise une ferme de calcul basée sur une architecture hybride, comprenant des cartes GPU et CPU, et des logiciels qui reconstruisent et filtrent en ligne les événements à la fréquence maximum de croisement des paquets dans le LHC. Un

ensemble complexe d'opérations de reconnaissance des formes est effectué à 30 MHz pour un volume de données de 40 Tb/s, ce qui permet d'exploiter exhaustivement les événements utiles pour la physique. Après approbation, en 2020, du projet Allen (RTA avec l'option GPU), le groupe du LPNHE a joué un rôle majeur dans sa réalisation. Dans ce cadre, un partenariat avec le laboratoire LIP6 a été noué. Le système est actuellement en exploitation et permet la prise de données à pleine capacité.

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 de l'ordre de quelques millimètres. Il est suivi par un premier élément, le détecteur de lumière Cherenkov 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, précédé par des chambres à micro-pistes de silicium, et enfin en aval trois stations composées de micro-pistes de silicium (près de l'axe du faisceau) et de chambres à dérive gazeuses (à l'extérieur). Après ce système de trajectographie, il y a un deuxième compteur RICH2 pour l'identification des particules d'impulsion comprise 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 subi une cure de jouvence, plusieurs sous-détecteurs évoluant (parmi lesquels le trajectographe), ainsi qu'une grande partie de la chaîne d'acquisition. Le 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 progrès, le détecteur est devenu plus efficace, plus flexible et est 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 impliquée dans les jouvences de LHCb : dans le trajectographe à fibres scintillantes (SciFi), dans le projet RTA, et plus récemment dans le projet PCIe400.

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 surtout les désintégrations semi-leptoniques du type $b \rightarrow s \ell^+ \ell'^-$ 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 à boucles électrofaibles, "pingouins" ou en boîte, et est donc fortement supprimé. De nouvelles particules pourraient intervenir dans ces boucles et avoir une contribution comparable aux processus standards. Ces canaux sont donc sensibles à des processus physiques non décrits par le modèle standard, comme pour les modèles mettant en jeu des mécanismes de Higgs non-standard, des leptokuarks ou différents modèles de supersymétrie. Nous avons continué à étudier ces désintégrations en mesurant pour la première fois l'universalité leptonique entre $B^0 \rightarrow K^0 \mu^+ \mu^-$ et $B^0 \rightarrow K^0 e^+ e^-$ dans le cas où la masse invariante des deux leptons est très grande. Cette mesure, qui est parfaitement compatible avec le modèle standard, a été approuvée par LHCb fin 2025. 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 recherchons égale-

ment 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 $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ e^-$. Si ces modes sont observés, il s'agira d'une preuve directe et non ambiguë de présence de nouvelle physique. La limite récemment obtenue sur le rapport de branchement de $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ e^-$ est la plus stricte dans un mode $b \rightarrow s \tau \ell$ et la première dans LHCb pour un état final avec à la fois un électron et un lepton tau (la distribution de masse $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ e^-$ est présentée figure 1).

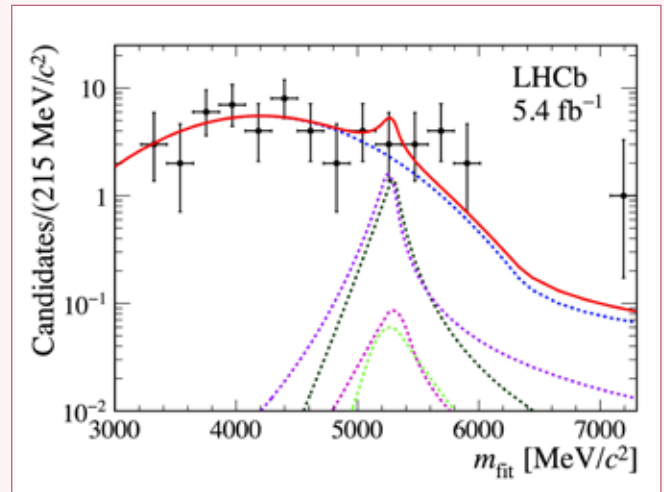


Figure 1 : Distribution de la masse m_{fit} des candidats $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^+ e^-$ sélectionnés, avec le résultat de l'ajustement simultané (en rouge). La ligne bleue pointillée est le bruit de fond et les autres lignes représentent le signal, avec différents modes de reconstruction du τ .

L'équipe mène à bien également un test de violation de l'universalité leptonique dans les canaux de type $b \rightarrow c \ell^+ \nu$, via la mesure du rapport RD^* 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, réalisée au LPNHE, de l'efficacité de reconstruction des électrons dans le détecteur, basée sur les désintégrations $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ avec $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$. Nous avons effectué des tests de violation de l'universalité leptonique 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 $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$. Enfin, l'équipe effectue la mesure de l'élément de matrice CKM V_{ub} avec le mode $B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$.

L'étude des désintégrations 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 $B_{d,s} \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$, ($h(\prime) = K, \pi$) avec l'ensemble des 9 fb^{-1} de données disponibles ; elle inclut 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 au long terme, progressant par étapes de complexité croissante. 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 le deuxième cas, la mesure n'a jamais été réalisée. Notre équipe a effectué 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 2024 et 2025 de nombreux rôles de responsabilité dans la collaboration LHCb, entre autres le rôle de *operations coordinator & deputy technical coordinator* de LHCb, la responsabilité d'un groupe de travail de la collaboration, ainsi que des responsabilités liées à la jouvence du détecteur. Les membres de l'équipe ont participé à l'organisation de plusieurs événements scientifiques. Le réseau ITN-SMARTHEP finance l'une des thèses en cours et l'ANR franco-allemand ANN4EUROPE en finance une autre. Nous avons également obtenu un financement Européen INFRA-TECH pour quatre postes IN2P3 affectés au projet RTA, dont un au LPNHE (pour le projet ODISSEE, voir ci-après).

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, car le taux d'occupation est trop élevé à haute luminosité. Pendant le dernier arrêt prolongé de l'accélérateur, l'ancien trajectographe a été remplacé par le détecteur SciFi, composé de fibres scintillantes lues par des photomultiplicateurs silicium (SiPM). La [photo 2](#) montre le SciFi et ses modules pendant la phase d'installation, une partie de l'électronique *Front End* est visible.



Photo 2 : Le détecteur SciFi pendant la phase de montage dans la cave de l'expérience LHCb. On note le passage aménagé pour le tube à vide du LHC. On distingue une partie de l'électronique de Front End (en bleu), aux deux extrémités des modules à fibres scintillantes du SciFi.

Le SciFi est résistant aux radiations, a une granularité spatiale fine et permet la reconstruction des traces dans RTA (voir ci-dessous). Après l'acquisition du signal des SiPM par l'électronique *Front End*, les données sont transmises à la ferme de calcul via des cartes de lecture génériques : les PCIe40, qui font partie de l'électronique dite de *Back End*. Le LPNHE s'est impliqué dans le projet *Back End*, plus précisément dans le microcode des cartes PCIe40 spécifique au système SciFi, et les logiciels associés. Un ingénieur de l'équipe a été le coordinateur de l'électronique *Back End* pour LHCb. Notre équipe a assuré l'installation et la mise au point du système, et continue à assurer sa maintenance.

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 la fréquence d'acceptation maximale était de 1 MHz. Ainsi, l'expérience fonctionne maintenant avec un déclenchement purement logiciel qui traite la totalité des événements détectés à la cadence du croisement des faisceaux du LHC (30 MHz). Le détecteur produit un débit maximal de 40 Tbit/s, qu'il faut réduire avant de pouvoir stocker les données. Pour cette raison, la reconstruction complète des événements est effectuée en temps réel, permettant d'éliminer la majorité des données brutes, sans les enregistrer. Ce processus et les systèmes le permettant 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 traiter le flux de données de LHCb avec les performances requises

pour la physique représente un réel défi. Le projet Allen, une contribution du LPNHE, a réussi à relever ce défi : Allen permet d'effectuer la première étape du déclenchement (HLT1) à l'aide de centaines de GPU, une première mondiale. Un schéma de ce système de déclenchement, avec Allen, est représenté [figure 3](#). En 2023 et 2024 ce système a été amélioré par l'ajout de cartes GPU, passant de 200 à 350 et finalement 500 cartes. Ceci a permis à LHCb d'utiliser des algorithmes plus lourds que ceux décrits dans le *Technical Design Report*. En 2024, LHCb et HLT1 ont fonctionné de manière nominale, et cela s'est poursuivi en 2025, avec de nouvelles améliorations en matière d'efficacité et de stabilité de la prise de données. L'équipe du LPNHE a fait plusieurs autres contributions techniques au projet RTA, parmi lesquelles 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, ont permis d'optimiser à la fois la vitesse d'exécution et l'utilisation des 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.

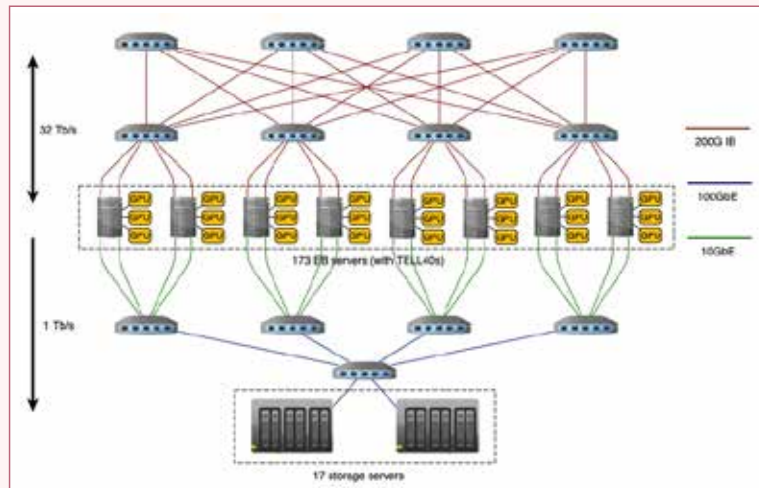


Figure 3 : La partie supérieure du schéma illustre le débit de données venant du détecteur à l'entrée du système de déclenchement, à un débit de 32 Tb/s. La partie centrale représente le cœur du projet Allen : ce sont les serveurs qui reconstruisent les événements, avec trois GPU chacun, produisant 1 To/s de données. La partie inférieure 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 aux CPU de la deuxième partie du système de déclenchement, le HLT2.

Après la réussite du système HLT1, plus de temps a pu être dédié aux initiatives R&D visant une reconstruction par réseau de neurones, à travers des projets SMARTHEP et ODISSEE. En 2024 et 2025 l'équipe du LPNHE a développé une reconstruction pour le détec-

teur de vertex LHCb qui utilise un réseau de neurones sur graphe (GNN), avec des performances qui dépassent déjà celles de la reconstruction standard LHCb, alors que l'optimisation du GNN n'est pas achevée.

L'activité sur le projet PCIe400 pour l'upgrade II

La phase II de la jouvence de LHCb prévoit de remplacer les cartes Back end et de distribution des signaux rapides du détecteur actuel (différentes déclinaisons firmware des cartes PCIe40, utilisées par les expériences LHCb et ALICE) par des cartes plus puissantes et mises à jour technologiquement, en vue de les utiliser pour le Run 5 (à partir de 2036). Dans le puzzle de la chaîne d'acquisition des données LHCb, les cartes *Back end* et leurs avatars prennent en charge le contrôle, l'agrégation, la mise en forme et la transmission des données remontant des cartes *Front End* utilisées sur les différents sous-détecteurs (ces dernières numérisent les signaux physiques au plus près du détecteur). En pratique, les cartes *Back end* permettent également de faire la jonction entre le domaine du *Front End*, utilisant des éléments électroniques conçus et construits spécifiquement pour LHCb, par les laboratoires participants, et des systèmes en amont basés sur des produits commerciaux, utilisés plus couramment; les liens séries optoélectroniques GBT (GigaBit Transceiver, standard CERN) résistants aux radiations, qui font justement le lien entre le *Front End* et le *Back End*, avec les PCIe40/PCIe400, sont de bons exemples de développement électronique spécialisé propre à la physique des particules. La carte PCIe400 est issue d'une collaboration (née en 2022) impliquant des équipes d'électronique de l'IN2P3 (CERN, CPPM, IJCLAB, LPC, LPNHE, SUBATECH, ...) dont le maître d'œuvre est le laboratoire CPPM, à Marseille. Le LPNHE prend part à ce projet depuis 2025. Cette carte est une profonde évolution de la carte *Back end* PCIe40, qui est en exploitation jusqu'à la fin du *Run 4*. Techniquement, il s'agit d'une carte au facteur de forme GPU ([voir photo 4](#)), PCIe Gen5x16, construite autour d'un SOC FPGA Intel/Altera Agilex 7-M, intégrant un processeur ARM HPS 4 cœurs. La carte comprend 32 Go de mémoire rapide HBM2e. Du côté *Front End*, elle peut jusqu'à 48 liens série bidirectionnels (transcepteurs 26 Gb/s NRZ) pour le lpGBT (le successeur du GBT : au moins 10 Gb/s/lien).



Photo 4 : Vue d'un prototype de carte PCIe400.

La partie de gestion des signaux rapides utilise les systèmes White Rabbit et TTC/PON, avec des PLL embarquées de grande précision (*jitter* à 100 fs RMS). Du côté *Back End*, vers la ferme de traitement des événements complets (*Event Builder*, RTA, etc.), la carte utilise la liaison PCIe Gen5, ainsi que des interfaces Ethernet rapides (400 Gb/s). La consommation en utilisation normale est contenue, moins de 200 Watts. La carte est assez versatile par le côté modulaire de l'Agilex (la mémoire HBM, les liaisons séries ou Ethernet étant implantées sur chiplets). Le LPNHE a contribué au développement et à la mise au point du système pour la qualification de la carte. Ce développement implique la conception de modules d'interface et de supervision pour les tests des transcepteurs 25 Gb/s ainsi que le portage du IpGBT utilisant ces transcepteurs. En outre, le LPNHE a développé des blocs VHDL configurables pour monitorer les fréquences des signaux générés par la carte, pour la gestion des liens série, ainsi que des modules de test en température. Un travail sur les capacités liées à la présence de mémoire HBM et du processeur HPS a débuté très récemment.

Chercheuses et chercheurs :

Eli Ben-Haïm, Pierre Billoir, Matthew Charles, Luigi Del Buono, Vladimir V. Gligorov, Francesco Polci, Pascal Vincent, Zekun Jia

Équipe technique :

Aurélien Bailly-Reyre, Gabriel Degret, Nabil Garroum, Jean-Luc Meunier, Gonzalo Lopez Diaz

Doctorantes et doctorants :

Renaud Amalric, Aloïs Caillet, Andrea Campomagnani, Anthony Correia, Tommaso Fulghesu, Fotis Giasemis (officiellement au LIP6), Edoardo Mariani, Diego Mendoza-Granada

CHIFFRES CLEFS

Nouveau système de déclenchement de LHCb : maintenant **500 GPU** traitant **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.

119 articles publiés par LHCb entre janvier 2024 et novembre 2025. Au total, **798** articles jusqu'à novembre 2025.

La physique des neutrinos au Japon : de T2K à Hyper-Kamiokande

Le groupe neutrino est engagé depuis plus de 20 ans dans la mesure des oscillations de neutrinos sur de longues distances. Ces mesures se font au Japon à l'aide d'un faisceau de neutrinos (ou d'anti-neutrinos) produit par l'accélérateur de J-PARC. Ce faisceau traverse d'abord un détecteur proche (ND280 à 280 m) puis un détecteur lointain (SuperKamiokande à 295 km) et c'est de l'analyse comparée de leurs observations que l'on en tire une mesure détaillée des paramètres d'oscillations de neutrinos. La bonne connaissance du faisceau et la maîtrise des détecteurs sont donc essentiels pour ces mesures de précision.

Pour l'expérience T2K, dite de deuxième génération, les activités hardware (instrumentales) du groupe ont porté sur la connaissance du faisceau, à travers une expérience ancillaire menée au CERN (NA61/SHINE), et sur le détecteur proche (ND280) et plus particulièrement sur son système de chambres à projection temporelle. Le groupe a également fortement contribué aux analyses de physique. Après une première série de mesures importantes de l'expérience T2K (première observation de l'apparition de ν_e dans un faisceau de ν_μ en 2013, première indication d'une possible violation de CP maximale avec les neutrinos en 2020) la collaboration a décidé de mettre à niveau le détecteur proche ND280 pour confirmer ces résultats et préparer l'expérience de troisième génération, HyperKamiokande. Les activités du groupe ont donc suivi cette évolution avec une contribution importante sur la jouvence de ND280 mais également sur la préparation du système d'horloge (génération et distribution) pour HK. Côté logiciel et analyse, le groupe contribue à l'amélioration de la reconstruction dans le détecteur proche et ses chambres à projection temporelle mais aussi dans le détecteur lointain HK et il participe à la mise à jour de la sensibilité attendue de l'expérience.

Nouvelle phase de l'expérience T2K

La nouvelle phase de l'expérience T2K vise à approfondir les premières indications de violation de CP dans les neutrinos, mais s'inscrit aussi dans le contexte de la préparation du programme de physique de HK. La

mise à niveau de ND280 s'est faite en particulier par l'installation d'une nouvelle cible pour les neutrinos, le SuperFGD constitué de 2 millions de cubes scintillants et encadré par 2 chambres à projection temporelle (HA-TPC) et leur électronique de lecture, conçue au LPNHE. Cette installation s'est achevée courant 2024 (voir photo 1) et une première prise de données test en cosmiques a permis de faire un *commissioning* détaillé du détecteur complet (voir figure 2).

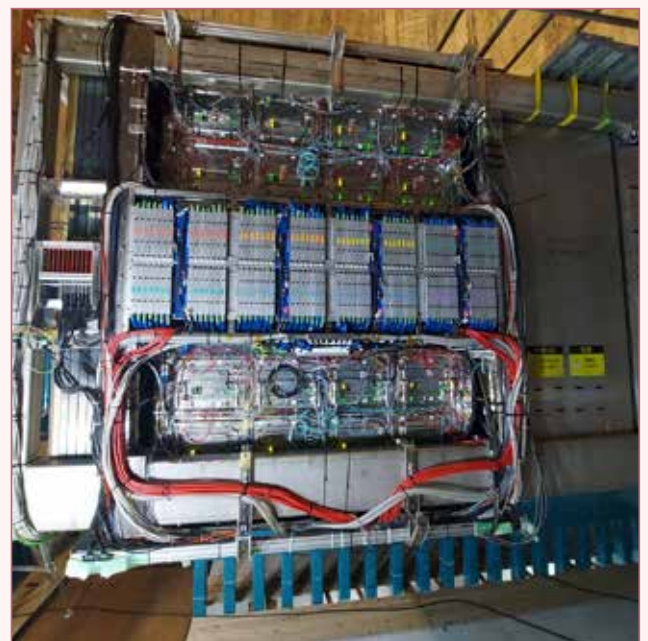


Photo 1 : Les nouveaux détecteurs de ND280 suite à la jouvence, installés à J-PARC.

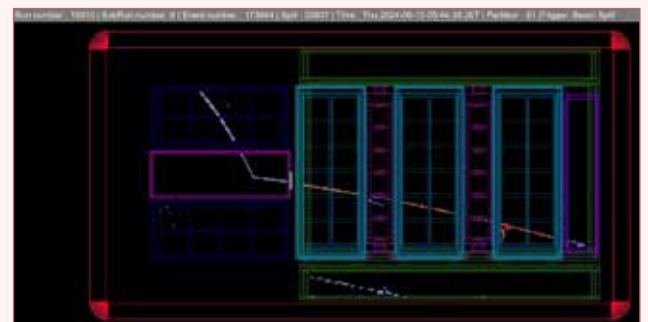


Figure 2 : Interaction de neutrino dans le Super-FGD avec des traces dans les HA-TPC et les TPC verticales.

L'utilisation, pour les nouvelles TPC, de détecteurs Micromegas résistifs a justifié le développement d'une nouvelle méthode de reconstruction des traces, dite logQ, plus robuste et plus précise, développée au LPNHE. Testée sur des données cosmiques et sur



Photo 3 : Prise des données dans la salle de contrôle de ND280.

les premières données en faisceau, cette reconstruction permet une résolution spatiale de l'ordre de 600 microns, qui assure une résolution en impulsion meilleure que 10 %, conforme aux exigences de la collaboration pour ses objectifs de physique. En parallèle le groupe s'est investi dans le développement du cadre d'analyse au sein de l'outil GUNDAM, pour faciliter l'étude des sensibilités de l'expérience après sa mise à niveau. La mise en service du détecteur ND280 amélioré durant l'été 2024 ainsi que la première prise de données avec l'ensemble des sous-détecteurs constitue un des événements marquants de l'expérience T2K et du groupe Neutrino du LPNHE sur les deux années écoulées (voir photo 3).

Parmi les incertitudes systématiques à réduire et à maîtriser pour les mesures de précision qu'est devenu le champ des oscillations de neutrinos, les sections efficaces d'interaction jouent un rôle majeur. Et c'est par un effort commun des expérimentateurs et des théoriciens que des incertitudes de l'ordre de 1 % seront atteintes. Dans les modèles théoriques existants, celui de Martini et al. est le premier à avoir inclus les excitations multinucléons (2p2h et 3p3h) et le groupe du laboratoire a réalisé la première implémentation de ce modèle d'interaction de neutrinos dans le générateur d'événements GENIE, très utilisé dans les expériences sur les neutrinos. Un accord raisonnable a été observé entre les prédictions

de ce modèle intégré dans GENIE et les données de T2K sur carbone et sur oxygène.

Enfin un autre fait marquant de ces deux dernières années est la publication dans la revue Nature de la première analyse conjointe des expériences T2K et NOvA (voir figure 4). Cinq années ont été nécessaires au groupe de travail conjoint pour aboutir à ce résultat. En l'état, les données combinées ne favorisent aucune des deux hiérarchies de masse possibles des neutrinos. Si la hiérarchie était "normale" ($m_{\nu_3} > m_{\nu_2} > m_{\nu_1}$) les données conjointes ne permettraient pas de statuer sur la violation de CP : T2K et NOvA donnent des indications divergentes. Par contre, si la hiérarchie de masse est "inversée" alors le résultat conjoint donne une indication claire de violation de CP. D'autres données seront nécessaires pour trancher, d'autant plus facilement si une mesure directe de cette hiérarchie était apportée par ailleurs, par JUNO ou KM3NeT par exemple. Une autre analyse conjointe de T2K avec la collaboration Super-Kamiokande a également été menée et publiée en 2024. Les données de faisceau de T2K et atmosphériques de SK tendent à exclure la conservation de CP, mais avec une signification statistique encore faible (1,9 sigma).

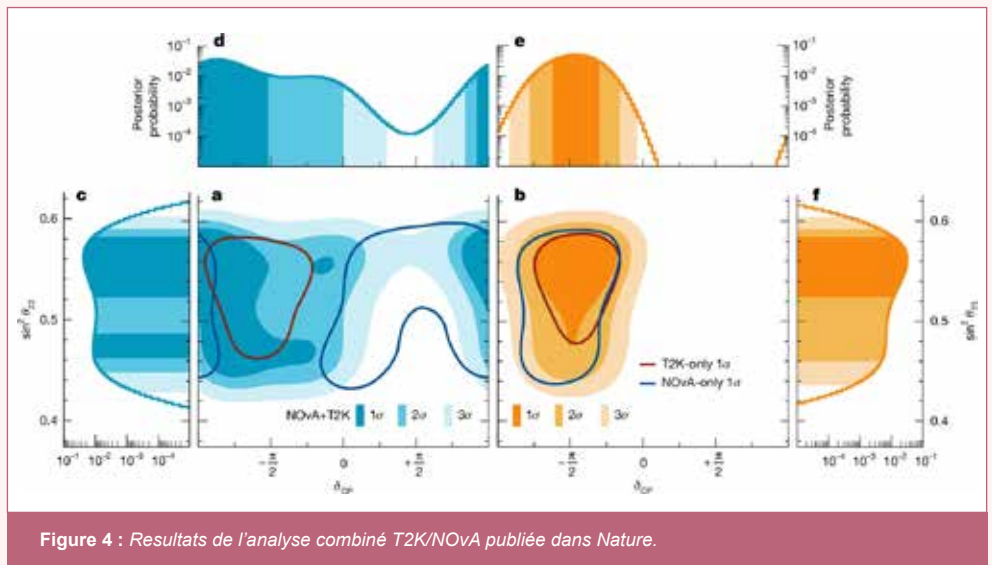


Figure 4 : Résultats de l'analyse combinée T2K/NOvA publiée dans Nature.

Projet Hyper-Kamiokande : phase de construction

L'expérience HyperKamiokande fait partie de la prochaine génération d'expérience de neutrinos à longue ligne de base. Elle passe par la construction d'un détecteur Cherenkov à eau d'un volume fiduciel huit fois plus important que SuperKamiokande, qui étendra considérablement le domaine de physique couvert et la

précision de ses mesures. La construction des infrastructures (tunnels d'accès et caverne) dans la montagne près de Kamioka s'est achevée le 31 juillet 2025 (voir photo 5). Elle va permettre une installation des équipements et photodétecteurs (plus de 20 000 sont prévus) courant 2026 pour un début de remplissage de la cuve en 2027 et une prise de données en 2028.



Photo 5 : La caverne de Hyper-Kamiokande à la fin de l'excavation.

Les contributions instrumentales choisies par le groupe et soutenues par une ANR JCJC portent sur la production d'un système de distribution d'horloge et de synchronisation temporelle pour l'ensemble des photodétecteurs et l'extension de ce système à la synchronisation avec l'accélérateur de J-PARC. La base de temps nécessaire est élaborée à partir de la combinaison de plusieurs horloges atomiques de précision, construisant une fréquence de référence stable qui est comparée au temps universel (UTC) grâce à des récepteurs recueillant les informations en temps des constellations de satellites de navigation (comme GPS et Galileo). Cette conception s'est faite en collaboration avec le laboratoire des SYstèmes de Référence Temps-Espace (SYRTE, aujourd'hui LTE) de l'Obser-

vatoire de Paris, le laboratoire de référence pour les activités de métrologie sur le temps et les fréquences en France et dans le monde. Une installation test a été déployée sur le toit de la tour 13 à Jussieu avec antenne et récepteur GNSS, horloge Maser à hydrogène Passive extrêmement stable et lien fibré avec la base de temps du SYRTE. Les performances de deux types d'horloges atomiques ont été testées : Rb et Cs (voir photo 6). Cette installation a également été utilisée pour le développement de l'algorithme de correction qui a permis d'obtenir une précision de synchronisation avec UTC de l'ordre de 15 ns. Un article rédigé en collaboration avec nos collègues de SYRTE a été publié.



Photo 6 : Tests des horloges atomiques pour Hyper-Kamiokande.

Au niveau de la distribution des horloges, la conception et les premiers prototypes de la carte TDM (*time distribution module*) ont été finalisés au LPNHE. Un test de l'ensemble de l'électronique incluant le TDM a été mené au CERN (le *vertical slice test*) et complété au LPNHE par un banc test qui a permis l'évaluation de différents moyens de refroidissement de la carte, le développement de son système de *monitoring* et d'un logiciel de tests automatisés à installer chez le sous-traitant en vue de la production et de la validation des 90 cartes du projet.

Côté développements logiciels, le groupe contribue à l'amélioration de l'algorithme de reconstruction dit *fitQun* actuellement utilisé par SK. Cet algorithme repose sur une fonction de vraisemblance complexe qui, pour chaque hypothèse de trajectoire, prédit la charge collectée au niveau des PMT. L'une des parties les plus gourmandes en calculs du *fitQun* est l'évaluation des corrections de lumière diffusée, qui nécessite une interpolation en six dimensions pour chaque ensemble de paramètres de trajectoire pendant l'ajustement du maximum de vraisemblance. Le travail actuel est consacré à l'exploration des moyens de simplifier cette interpolation et de minimiser l'impact de cette simplification sur les performances physiques.

Quant au travail de préparation à l'analyse, Les membres du groupe ont apporté une contribution décisive à une étude récente sur les sensibilités actualisées d'Hyper-Kamiokande avec des neutrinos de faisceau. Cette étude, qui a fait l'objet d'un article récemment accepté pour publication (voir figure 7), démontre pour HK un grand potentiel de découverte. Ce travail sera prolongé en y intégrant la combinaison des données de neutrinos d'accélérateur et atmosphériques.

Pour poursuivre la réduction des incertitudes systématiques, qui gouvernent la sensibilité de l'expérience, un travail est en cours sur l'analyse des nouvelles données prises dans l'expérience NA61/SHINE sur la cible réplique de T2K. Cette analyse sera transposable sur

HK avant que des données sur une cible réplique de HK soient collectées. Plus largement le rôle de NA61/SHINE pour les expériences de précision que sont devenues les expériences neutrinos est central: les cibles de T2K mais aussi de DUNE ont fait l'objet de collections de données massives et si le projet de ligne de faisceau de basse énergie au CERN aboutit, des données essentielles pour les neutrinos atmosphériques pourront être collectées et analysées.

Une autre approche pour la réduction des incertitudes passe à terme par une nouvelle mise à niveau du détecteur proche. En 2025 le groupe a lancé une nouvelle R&D (ND280++), soutenue par une ANR PRCI avec l'ETH de Zurich et par l'obtention d'une bourse postdoctorale Marie-Curie. Le projet vise à construire un détecteur d'une granularité similaire à celui du Super-FGD, de l'ordre de 1 cm^3 , mais utilisant du scintillateur liquide à base d'eau (WbLS) pour pouvoir détecter des interactions des neutrinos sur oxygène, comme dans l'eau du détecteur lointain. Le principal défi de cette R&D au LPNHE, nommée NuCubes, est que le rendement en lumière intrinsèque du WbLS est inversement proportionnel à la proportion d'eau et qu'il est 10 fois moins élevé que dans le scintillateur liquide ou plastique pour la fraction de 90 % d'eau visée. La R&D vise donc à trouver une configuration pour chaque voxel de WbLS qui maximise la quantité de lumière reçue sur le Silicon Photomultiplier (SiPM), en optimisant le couplage entre le SiPM et les fibres, la quantité et le type des fibres,

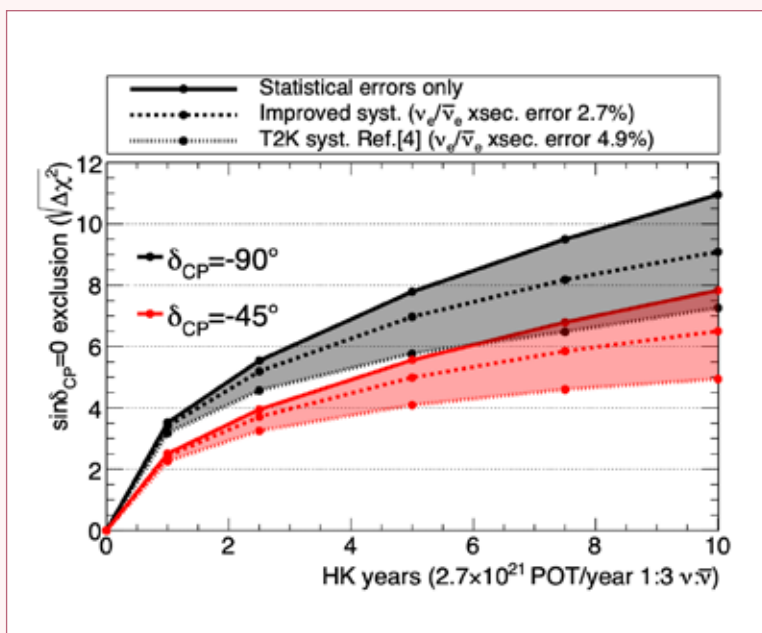


Figure 7 : Sensibilité attendue pour l'expérience Hyper-Kamiokande à la violation de CP.

ou la réflectivité de parois de chaque cube. Un autre défi est que la boîte dans laquelle le détecteur sera installé doit être étanche. Plusieurs prototypes seront réalisés au LPNHE (voir photo 8), dans le but de construire un prototype d'une masse de ~100 kg à installer sur le faisceau de neutrinos de J-PARC en 2027. Le détecteur final d'environ 5 tonnes serait à installer dans ND280 à l'horizon 2030, pour la phase de haute précision de Hyper-Kamiokande.

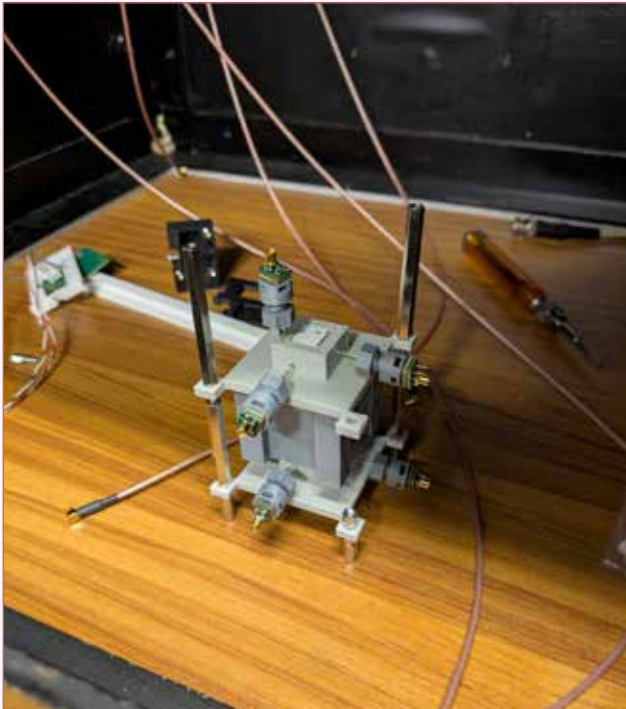


Photo 8 : Détecteur rempli avec du scintillateur liquide à base d'eau et lu par des fibres et de SiPM dans l'R&D NuCubes au LPNHE.

Chercheuses et chercheurs :

Pierre Billoir, Alain Blondel, Claudia De Dominicis, Gonzalo Diaz Lopez, Jacques Dumarchez, Daniel Ferlewicz, Claudio Giganti, Vladimir Gligorov, Mathieu Guigue, Marco Martini, Boris Popov, Maria Adriana Sabia, William Saenz-Arevalo, Marco Zito

Équipe technique :

Sebastien Colinot, Guillaume Daubard, Romain Gaior, Evan Hily, Alexandre Lantheaume, Eric Pierre, Stefano Russo, Vincent Voisin

Doctorantes et doctorants :

Anaëlle Chalumeau, Claire Dalmazone, Alejandro Nicolas Gacino Olmedo, Lorenzo Restrepo, Lavinia Russo, Ulysse Virginet

CHIFFRES CLEFS

Mesure la plus précise de la différence de masse des neutrinos $\Delta m_{32}^2 = 2,43_{-0,03}^{+0,04} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ dans l'analyse combinée T2K+NOvA.

Algorithme de synchronisation avec UTC à moins à **15 ns** près

Hyper-K détecterait environ **3 000** événements pour une explosion de supernova dans le Grand Nuage de Magellan, à une distance de **50 kpc**.

Expérience COMET à J-PARC

L'expérience COMET, installée sur le site du J-PARC au Japon, constitue aujourd'hui l'un des programmes les plus ambitieux de la physique des particules de basse énergie. Elle s'inscrit dans la recherche d'événements rares qui offrent une fenêtre unique sur la physique au-delà du Modèle Standard. Parmi ces processus, la transition cohérente d'un muon en électron assistée par un noyau, notée $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$, occupe une place centrale. Ce processus viole la conservation de la saveur leptonique chargée

(CLFV) et donne accès, de manière indirecte, à des échelles d'énergie inatteignables au LHC, pouvant atteindre plusieurs milliers de téraélectronvolts. L'expérience COMET (Coherent Muon to Electron Transition), conduite au J-PARC avec le soutien de l'IN2P3 à travers la collaboration COMET-France, vise à atteindre une sensibilité de 3×10^{-17} . Cette précision extrême permettrait de détecter ou de contraindre des processus de violation de la saveur leptonique liés à de nouvelles interactions fondamentales. Le projet

se déploie selon une stratégie progressive articulée en plusieurs phases expérimentales. La Phase-I (voir figure 1 et 2) permettra d'évaluer la stabilité du spectre de muons arrêtés et d'optimiser les paramètres du transport magnétique avant la montée en puissance vers la Phase-II, dont l'objectif est la recherche directe du signal de conversion muon en électron. Cette dernière phase intégrera l'ensemble des détecteurs définitifs et exploitera le faisceau complet délivré par J-PARC, ouvrant la voie à la mesure à pleine intensité.

En 2025, COMET a franchi une étape majeure de son développement : le solénoïde du détecteur (DS) a été

livré et installé (voir photo 3) avec succès dans le bâtiment expérimental, marquant un jalon clé du calendrier de mise en service. Cette arrivée a été accompagnée du solénoïde de liaison (BS), également installé et testé. Le solénoïde de liaison assure la connexion magnétique et géométrique entre la ligne de transport des muons et la région de détection, garantissant la continuité du champ et la focalisation des particules dans la zone de mesure. Le solénoïde du détecteur, cœur du système expérimental, abrite les détecteurs principaux, en particulier la chambre à dérive cylindrique, et assure un champ magnétique homogène et stable indispensable à la mesure de l'impulsion des électrons issus

des conversions muoniques. Les vérifications initiales effectuées sur le BS et le DS se sont déroulées sans anomalie, confirmant la conformité mécanique et cryogénique des deux structures. L'installation de ces éléments marque une transition vers la phase d'intégration complète du spectromètre et du système de lecture. Les infrastructures d'alimentation, de refroidissement et de cryogénie sont désormais pleinement opérationnelles. Ces progrès ouvrent la voie à la qualification du dispositif complet et à la préparation des premières prises de données avec faisceau muonique complet fin 2026.

Au sein de la collaboration française, les contributions portent sur plusieurs volets essentiels à la réussite scientifique de COMET. Nous développons des algorithmes de reconstruction de traces fondés sur des techniques avancées d'analyse topologique, notamment l'homologie persistante, permettant de mieux caractériser la géométrie complexe des trajectoires dans la chambre à dérive. Cette approche renforce la robustesse de la reconstruction face aux effets de diffusion multiple et aux incertitudes de calibration. Ces développements s'appuient également sur des travaux récents, tels que ceux présentés dans le papier "GPU-accelerated Interval Arithmetic to solve the Apollonius Problem applied to a Stereo Drift Chamber" (arXiv:2401.04576), qui propose

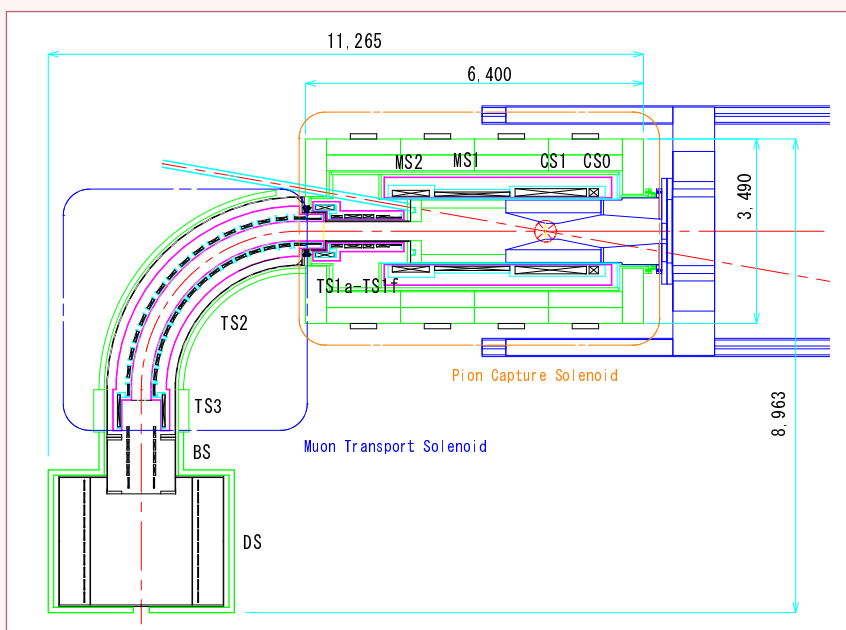


Figure 1 : Schéma du système de solénoïdes de la phase I de COMET, qui comprend le solénoïde de capture de pions (encadré orange), le solénoïde de transport de muons (encadré bleu), l'absorbeur de faisceau (partie droite du solénoïde de capture de pions) et le solénoïde du détecteur (partie inférieure du solénoïde de transport de muons).

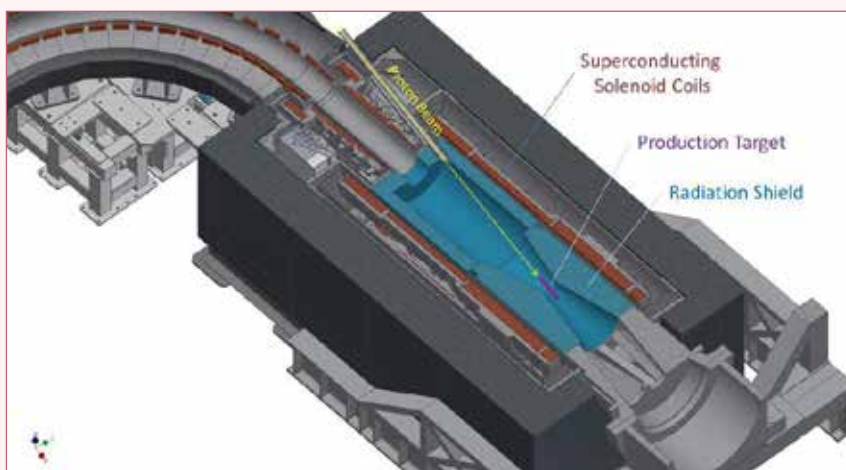


Figure 2 : Schéma du système de solénoïdes de capture de pions en vue 3D.



Photo 3 : Le solénoïde du détecteur (DS) est raccordé au solénoïde de liaison (BS) puis descendu dans le hall expérimental de COMET. Il s'agit d'une étape importante franchie par la collaboration COMET.

une méthode de reconstruction tridimensionnelle des trajectoires en chambre de dérive stéréo. L'algorithme, implémenté sur GPU à l'aide de l'arithmétique d'intervalles, résout de façon parallèle et précise le système géométrique associé au problème d'Apollonius. Appliquée à des données simulées, cette méthode offre une excellente stabilité numérique et une précision millimétrique, ouvrant la voie à des traitements rapides et fiables dans les conditions expérimentales complexes de COMET.

Parallèlement, la France assure la gestion du calcul, du stockage et des simulations, en coopération avec les ingénieurs du CC-IN2P3, qui héberge les productions massives de données simulées et offre un environnement de travail commun pour la collaboration. Cet effort logistique et numérique garantit la traçabilité des données, la cohérence des campagnes de simulation et la disponibilité des outils logiciels pour tous les partenaires. Sur le plan instrumental, la contribution française se concentre également sur la simulation et la maîtrise des bruits de fond d'origine cosmique, un aspect crucial de l'expérience.

En définitive, COMET représente un effort collectif international visant à sonder les symétries fondamentales de la matière avec une précision inégalée. Si la conversion cohérente du muon en électron venait à être observée, elle constituerait l'une des découvertes les plus importantes depuis la mise en évidence des oscillations de neutrinos.

Chercheuses et chercheurs :

Wilfrid Da Silva, Luigi Del Buono

Équipe technique :

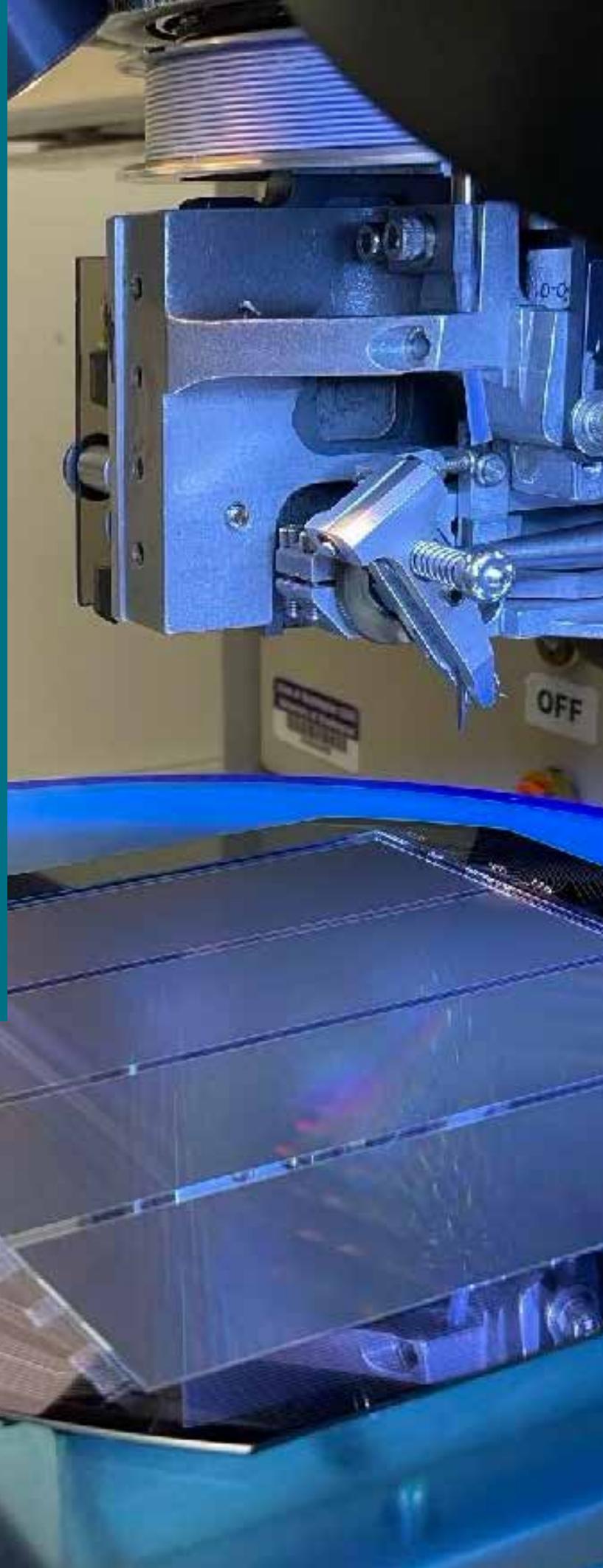
Patricia Warin-Charpentier





Astrophysique MultiMessager et Matière Noire (AM3N)

- **Astrophysique des hautes énergies et physique fondamentale avec H.E.S.S.**
 - Fonctions de réponses instrumentales
 - Étude astrophysique et suivi des noyaux actifs de galaxies
 - Décalage spectraux : recherche d'une éventuelle violation d'invariance de Lorentz
 - Recherche indirecte de matière noire
- **Le *Cherenkov Telescope Array Observatory*, le prochain observatoire en rayons gamma de très hautes énergies**
 - Développement et production des cartes *Front End Board* pour la caméra NectarCAM
 - Calibration de la caméra NectarCAM
 - Effets temporels intrinsèques dans les noyaux actifs de galaxie et violation de l'invariance de Lorentz
 - Prospectives sur les études de noyaux actifs de galaxies avec CTAO
- **GRAND : *the Giant Radio Array for Neutrino Detection***
 - Les prototypes GRAND
 - Le projet HERON
- **DAMIC-M leader mondial de la recherche de matière noire leptophilique**
 - Technique
 - Des résultats scientifiques exceptionnels
- **Recherche directe de matière noire avec l'expérience XENONnT**
 - XENON1T
 - Techniques de détection et d'analyse
 - Publications de physique
 - Contributions du LPNHE



Astrophysique MultiMessenger et Matière Noire (AM3N)

Le groupe de recherche « astrophysique multimessenger et matière noire », précédemment appelé « rayonnement cosmique et matière noire », poursuit l'exploration du contenu de l'Univers à ses deux extrêmes, depuis les phénomènes astrophysiques les plus énergétiques jusqu'aux constituants les plus insaisissables de la matière. À grande échelle, l'étude des sources transitoires de rayonnement gamma constitue un outil privilégié pour sonder la composition, la structure et la dynamique d'objets compacts et violents tels que les noyaux actifs de galaxie ou les sursauts gamma. Dans ce domaine en énergie, l'expérience H.E.S.S., un réseau de cinq télescopes à effet Cherenkov implanté dans l'hémisphère sud, a acquis depuis plus de vingt ans des données d'une richesse exceptionnelle. Depuis l'arrêt des opérations techniques au laboratoire en 2022, l'activité se concentre désormais sur l'exploitation scientifique approfondie de ces données, en particulier par l'amélioration continue des outils d'analyse et de modélisation instrumentale.

Ces développements s'inscrivent naturellement dans la préparation du futur observatoire CTAO, constitué de deux réseaux complémentaires, nord et sud, regroupant des télescopes de petite, moyenne et grande tailles couvrant un large champ de vue. Le groupe CTAO est fortement engagé dans la conception, la production et la validation de la caméra NectarCAM, qui équipera les télescopes intermédiaires du site nord. Grâce à une sensibilité accrue d'environ un ordre de grandeur par rapport aux installations actuelles, CTAO permettra d'augmenter considérablement la population de sources gamma connues et d'en approfondir l'étude spectrale et temporelle. Les travaux menés portent notamment sur les noyaux actifs de galaxies et leur variabilité à long terme ou rapide. Cette variabilité rapide observée pour certaines sources à grand *redshift* (décalage vers le rouge) ouvre la voie à des tests de physique fondamentale.

L'analyse fine des émissions transitoires de photons gamma offre en effet un cadre privilégié pour confronter les principes fondamentaux de la physique moderne, en particulier l'invariance de Lorentz, remise en question dans certains modèles de gravitation quantique. En étudiant les temps d'arrivée des photons en fonction de leurs

énergies et du redshift des sources, il devient possible de rechercher des décalages temporels extrêmement ténus par rapport aux prédictions des modèles standard de propagation. De nouvelles méthodes d'analyse non paramétriques ont ainsi été développées afin de limiter les hypothèses sur la forme intrinsèque des éruptions astrophysiques, renforçant la robustesse des contraintes expérimentales sur d'éventuelles modifications de la relation de dispersion des photons dans le vide.

À des énergies encore plus extrêmes, le groupe est impliqué dans le projet GRAND, qui ambitionne la détection de neutrinos d'ultra haute énergie à l'aide d'un vaste réseau d'antennes radio autonomes déployées à terme sur plusieurs continents. Un prototype de 65 antennes, GRANDProto300, est actuellement en cours d'exploitation et a permis la détection autonome des premiers rayons cosmiques. Les développements méthodologiques associés, tant au niveau du déclenchement que de la reconstruction des événements, ouvrent la voie à une nouvelle génération d'observatoires capables de sonder les phénomènes les plus énergétiques de l'Univers. Le groupe va également s'engager dans le projet HERON, qui combine détection phasée des gerbes induites par les neutrinos et détection autonome à la GRAND.

Au-delà de ces investigations astrophysiques et fondamentales, le groupe s'attaque à une autre énigme majeure de la cosmologie moderne : la nature de la matière noire. Si des recherches indirectes, reposant notamment sur l'observation des rayonnements gamma issus de galaxies naines sphéroïdales, ont permis d'établir des contraintes parmi les plus strictes à ce jour, un axe de recherche complémentaire, dit de détection directe, s'est fortement développé au laboratoire.

Dans ce cadre, l'expérience DAMIC-M exploite des CCD de nouvelle génération, dits « skipper », permettant une mesure répétée de la charge dans chaque pixel et une réduction drastique du bruit de lecture. Une interaction de matière noire avec les électrons du détecteur peut ainsi produire un signal ionisant de très basse énergie, détectable grâce à des seuils de quelques électron-volts. Les données récentes ont permis d'améliorer la sensibilité de plus d'un ordre de gran-

deur et d'exclure certains scénarios de matière noire légère dans la gamme du MeV, établissant à ce jour les meilleures limites mondiales pour ces masses.

L'expérience XENONnT constitue également l'un des instruments les plus sensibles pour la recherche directe de la matière noire. Fondée sur une chambre à projection temporelle au xénon diphasique de près de six tonnes, elle permet une localisation tridimensionnelle précise et une discrimination fine des événements. Après une première phase de prise de données ache-

vée en 2025, le détecteur a bénéficié d'améliorations majeures en vue d'une reprise des opérations début 2026. XENONnT a produit plusieurs résultats de portée mondiale, notamment la première observation de la diffusion élastique cohérente de neutrinos solaires sur noyau et l'atteinte du brouillard de neutrinos dans la recherche de matière noire légère. L'implication du LPNHE est centrale, tant pour l'analyse et la simulation que pour la préparation des détecteurs de prochaine génération, en particulier à travers le développement de XeLab et sa contribution au projet XLZD.



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

L'expérience H.E.S.S., qui collecte des données depuis 2002 est un réseau de cinq télescopes Cherenkov installé en Namibie. Depuis l'arrêt des activités techniques en 2022, le groupe se concentre sur les analyses de physique : étude des noyaux actifs de galaxies (NAG), suivi des alertes d'autres instruments, recherches en nouvelle physique (matière noire, effets de propagation liés à la gravitation quantique). Il est également impliqué dans la production des fonctions de réponses instrumentales.

Fonctions de réponses instrumentales

Le groupe est responsable de la production et de la livraison des fonctions de réponses instrumentales de H.E.S.S., utilisées dans l'une des deux principales chaînes d'analyse de la collaboration.

En avril 2024, la dernière version de ces *instrument response functions* (IRF) a été livrée. Elle intègre désormais le désalignement des miroirs en fonction de l'angle zénithal, améliorant la modélisation de la fonction d'étalement du point et le contrôle des erreurs systématiques, en particulier pour les sources faiblement résolues comme la nébuleuse du Crabe.

Le groupe produit également des simulations Monte Carlo *run-wise*, depuis les cascades atmosphériques jusqu'aux IRF associées, adaptées à des observations spécifiques et reflétant fidèlement les conditions réelles (pixels éteints, bruit de fond, etc.). Cette approche permet de réduire d'environ 20% les erreurs systématiques sur les paramètres spectraux des sources.

Étude astrophysique et suivi des noyaux actifs de galaxies

Le groupe du LPNHE étudie depuis longtemps les sources extragalactiques émettant dans le domaine du TeV, en particulier les NAG. Certains de ces objets présentent une variabilité rapide permettant de mesurer des délais entre photons d'énergies différentes, utiles pour mieux comprendre les sources ou tester d'éventuels effets de propagation (voir section suivante).

L'équipe assure aussi un suivi systématique des alertes d'autres observatoires pour les sources transitoires. L'outil FLapLUC, développé au laboratoire, est central pour cette activité en exploitant les données publiques au GeV de *Fermi-LAT*.

En 2024-2025, le groupe a contribué à plusieurs analyses de blazars, dont une vingtaine ayant montré des épisodes d'émission intense. On peut citer le suivi de quasars à spectre plat (FSRQ) à grand redshift, comme PKS 1725+123 ($z=0,586$) ou PKS 0405-385 ($z=1,28$). En cas de détection, ces sources pourraient fournir des contraintes importantes sur le fond diffus extragalactique ou sur la recherche de violation d'invariance de Lorentz. Une publication est également en cours sur une éruption du FSRQ PKS 0903-57 ($z=0,262$).

Ces travaux s'inscrivent dans la préparation scientifique du réseau CTAO, qui offrira de nouvelles possibilités d'études spectrales et temporelles des NAG, notamment pour les phénomènes à variabilité rapide.

Décalages spectraux : recherche d'une éventuelle violation d'invariance de Lorentz

Impliqué depuis plus de 15 ans dans la recherche d'effets de violation d'invariance de Lorentz (VIL), le groupe poursuit l'analyse des sources transitoires ou variables détectées par H.E.S.S. afin de mesurer d'éventuels décalages temporels entre photons d'énergies différentes. Dans une thèse du groupe soutenue en septembre 2025, les travaux ont porté sur un lot de données exceptionnel collecté lors de la grande éruption du blazar PKS 2155-304 en 2006. La complexité de la courbe de lumière à basse énergie (voir figure 1 page suivante) a conduit, pour la première fois, à utiliser une interpolation par *spline* plutôt qu'un ajustement analytique, évitant ainsi de devoir supposer une forme fonctionnelle. Cette méthode de *spline*, désormais intégrée à l'outil d'analyse, pourra être appliquée à d'autres données. La comparaison entre *spline* et ajustement montre des résultats compatibles, avec des incertitudes statistiques et systématiques similaires. Fin 2025, l'article de collaboration décrivant la méthode et les résultats de VIL pour l'éruption de PKS 2155-304 est en préparation.

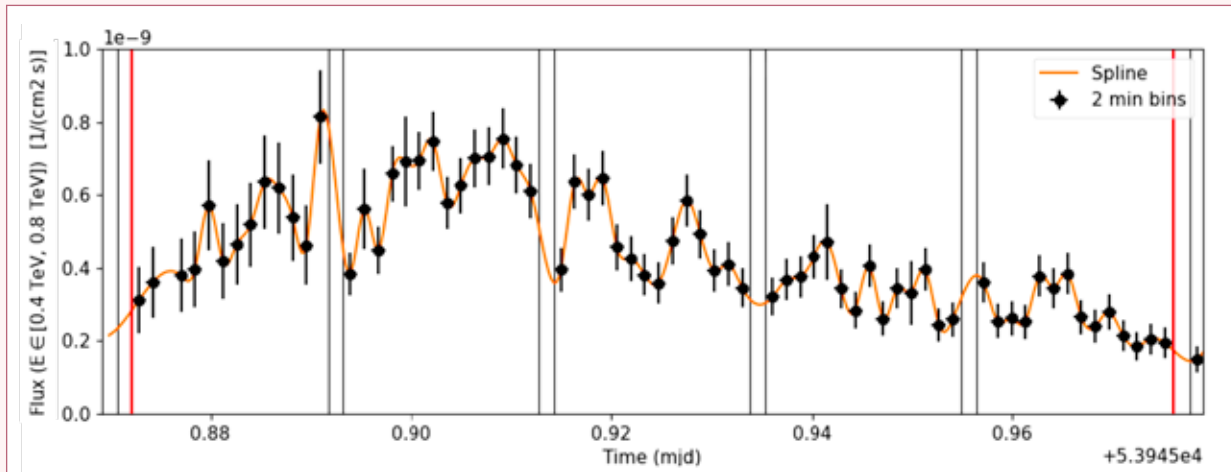


Figure 1 : Courbe de lumière (flux en fonction du temps) obtenue dans la gamme d'énergie 0,4 - 0,75 TeV à partir des observations du blazar PKS 2155-304 par H.E.S.S. la nuit du 29 juillet 2006. La courbe correspond à l'interpolation par spline, ingrédient essentiel pour l'estimation du décalage temporel.

Ces dernières années, le groupe du LPNHE a renforcé sa visibilité internationale sur la recherche d'effets de VIL grâce à sa participation active à deux réseaux européens : les Actions COST "Quantum Gravity phenomenology in the multimessenger approach" (QGMM) et "Bridging High and Low Energies in Search of Quantum Gravity" (BridgeQG). Cette implication a favorisé de nouvelles collaborations avec les phénoménologues et théoriciens travaillant sur la gravitation quantique. Plusieurs modèles de VIL prédisent aujourd'hui des relations de dispersion modifiées pour les photons dans le vide, différant notamment par leur dépendance au *redshift*, lié à la distance des sources. L'étude publiée en 2025 dans *Physical Review D*, co-signée par un théoricien (C. Pfeifer, ZARM, Université de Brême) et plusieurs membres des collaborations H.E.S.S., MAGIC et VERITAS, avec une forte contribution du LPNHE, a fourni une première comparaison de ces modèles (voir figure 2) et évalué la capacité des instruments actuels et futurs à les contraindre et à les distinguer.

Recherche indirecte de matière noire

Le groupe est également impliqué dans la recherche indirecte de matière noire. Dernièrement, il a fortement contribué à une publication présentant les résultats d'une recherche combinant les données de cinq expériences gamma (Fermi-LAT, HAWC, H.E.S.S., MAGIC, VERITAS) cumulées pendant plus d'une décennie. Cette étude, publiée en 2025 dans Journal

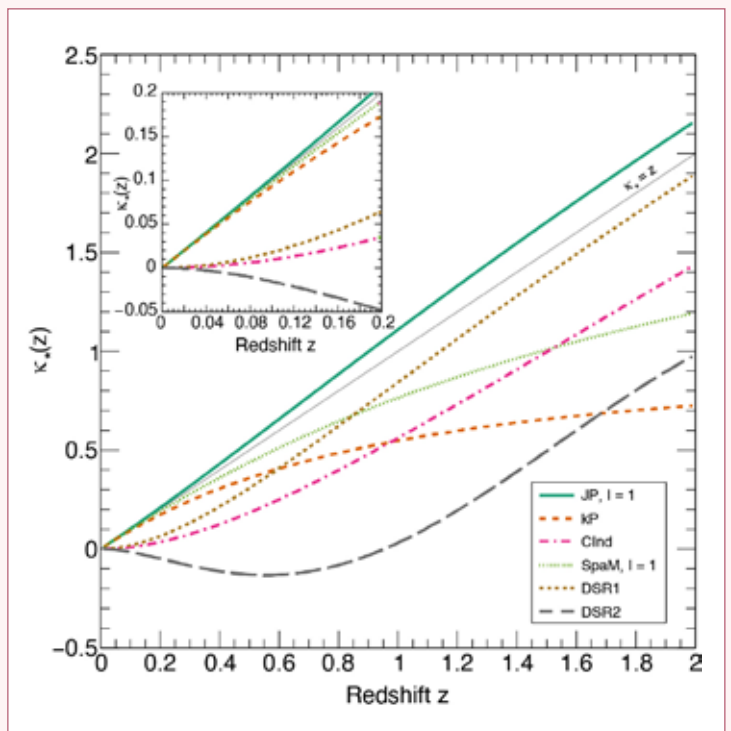


Figure 2 : Paramètres de distance intervenant dans le calcul du délai temporel obtenus à partir de différents modèles d'espace temps. Le modèle historique noté "JP", utilisé depuis le début des études de VIL, donne lieu aux écarts temporels les plus grands et aux meilleures contraintes.

of Cosmology and Astroparticle Physics, est la plus complète à ce jour portant sur les galaxies naines sphéroïdes, des galaxies satellites de la Voie Lactée. Elle a permis de fixer les contraintes les plus strictes et les plus robustes avec ce type de cibles à ce jour sur la section efficace d'annihilation de particules de matière noire pour des masses comprises entre 5 GeV et 100 TeV.

Chercheuses et chercheurs :

Julien Bolmont, Daniel Kerszberg, Jean-Philippe Lenain

Doctorantes et doctorants :

Guillaume Grolleron, Anastasiia Mikhno, Ugo Pensac

CHIFFRES CLEFS

En 2024, **1 449** heures d'observation cumulées et **96,5%** de disponibilité des **5** télescopes du réseau.

Sur la période 2024-2025, **20** alertes émises par l'outil automatique FLAAPLUC ont donné lieu à un suivi par H.E.S.S.

Le Cherenkov Telescope Array Observatory, le prochain observatoire en rayons gamma de très hautes énergies

Le Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO) est le futur observatoire de référence pour l'astronomie gamma de très hautes énergies. Il reposera sur deux réseaux de télescopes : l'un à La Palma (Canaries) dans l'hémisphère nord, l'autre dans le désert d'Atacama (Chili) au sud. Ces installations couvriront une gamme énergétique de quelques dizaines de GeV à plusieurs centaines de TeV grâce à trois types d'instruments : les télescopes de grande taille (LST), sensibles aux plus basses énergies ; les télescopes intermédiaires (MST), cœur du réseau ; et les petits télescopes (SST), dédiés aux énergies extrêmes.

CTAO-Sud, composé de 14 MST et 37 SST, ciblera prioritairement les sources Galactiques et la recherche de PeVatrons. Le site nord, avec 4 LST et 9 MST, observera surtout les sources extragalactiques, dont les photons les plus énergétiques sont atténués par le fond diffus extragalactique. Par rapport aux installations actuelles (H.E.S.S., MAGIC, VERITAS), CTAO offrira une sensibilité dix fois supérieure. En janvier 2025, la fondation de l'ERIC marque une étape clé, permettant à CTAO de prendre en charge la construction des réseaux et l'acceptation des télescopes.

Au LPNHE, le groupe CTAO est fortement engagé dans la conception, la production et la validation de la caméra NectarCAM, qui équipera les MST du site nord (voir photo 1). Il participe aussi au Science Working Group Extragalactique, notamment pour la caracté-



Photo 1 : Caméra NectarCAM en phase de tests en chambre noire au CEA/Irfu.

térisation de la population de noyaux actifs de galaxie (NAG), l'étude de leur variabilité, ainsi que l'analyse des effets fondamentaux pouvant influencer la propagation des rayons gamma.

Développement et production des cartes *Front End Board* pour la caméra NectarCAM

Chaque caméra NectarCAM comporte 265 modules de détection, chacun intégrant une *Front End Board* (FEB) entre le *Focal Plane Module* (FPM, équipé de sept photomultiplicateurs) et le *Digital Trigger Back Plane* (DTBP) de DESY-Zeuthen. Le LPNHE produit 2520 FEB pour équiper neuf caméras. Ces cartes amplifient, mémorisent, numérisent et transfèrent les données au serveur caméra. Leur FPGA, associé au *Nectar Module Controller* (NMC) sous OPC-UA, assure la configuration et la relecture.

Le *gateway* comprend désormais une version « usine » pour restaurer une configuration stable en cas d'échec de mise à jour, ainsi qu'un mécanisme d'inhibition des déclenchements fortuits liés à la diaphonie du *slow control*. Des problèmes de bruit de ligne de base observés lors de l'intégration au CEA/Irfu ont été résolus par une modification d'impédance des amplificateurs ACTA. Un *retrofit* de 1440 cartes est prévu en 2025-2026, tandis que les nouvelles cartes intègrent déjà la correction. La librairie NMC est également consolidée pour éliminer les fuites mémoire et assurer la stabilité requise.

Le groupe contribue aussi au logiciel de contrôle caméra (CaCo), initialement conçu pour les LST et désormais compatible avec NectarCAM. CaCo pilote les sous-systèmes via une machine à états garantissant une configuration cohérente pour les différents modes d'observation.

Calibration de la caméra NectarCAM

Le groupe participe au développement des algorithmes de calibration via *nectarchain*, une chaîne basée sur *ctape*. Il a récemment contribué à la caractérisation de l'inhomogénéité en gain et en champ plat de la source de calibration, montrant une performance conforme aux exigences du projet (voir figure 2).

Dans l'exploitation de CTAO, chaque caméra devra fournir au système central des données brutes pré-calibrées (calibration dite de catégorie A). Le groupe développe donc un *pipeline* pour extraire les coefficients de calibration nécessaires : piédestaux, gains ADC en photo-électrons et corrections de champ plat.

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

Le groupe d'astronomie gamma du LPNHE étudie depuis longtemps la possibilité d'une violation de l'invariance de Lorentz (VIL), qui se traduirait par un décalage temporel entre photons de différentes énergies. Depuis 2015, il explore aussi les effets temporels intrinsèques liés aux mécanismes d'émission dans les NAG, susceptibles de masquer ou d'imiter un signal de VIL.

En 2024-2025, en collaboration avec l'équipe du LUX de Meudon, le groupe a évalué la capacité de CTAO à mesurer ces effets via un modèle d'éruption de blazar développé dans deux thèses successives. Selon les conditions initiales, les retards prédits pourraient être détectables. L'étude analyse aussi la possibilité de distinguer effets intrinsèques et effets VIL, montrant que CTAO seul ne suffira probablement pas sans données multi-longueurs d'onde ou observations supplémentaires à très haute énergie d'objets à différents *redshifts*.

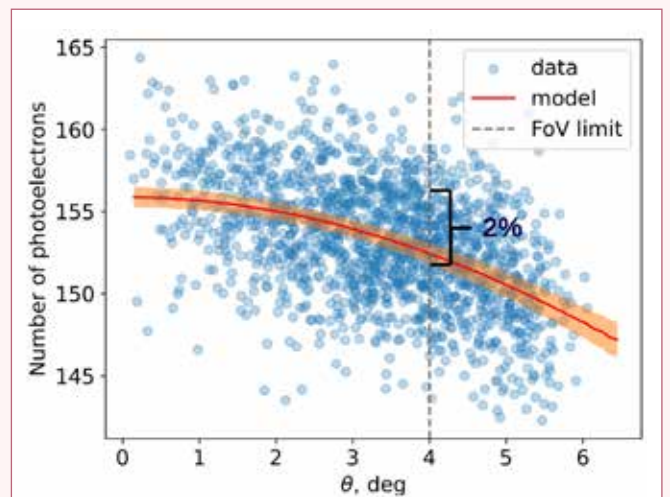


Figure 2 : Distribution radiale de l'intensité d'une acquisition de calibration en champ plat de NectarCAM, pixel par pixel en bleu. Un modèle gaussien ajusté aux données est montré en rouge, montrant que le contrôle sur ce modèle est meilleur que 2%, en accord avec les prérequis du projet. D'après Mikhno et al. (2025).

Prospectives sur les études de noyaux actifs de galaxies avec CTAO

Le groupe étudie les perspectives offertes par CTAO pour les NAG : population détectable, fonction de luminosité, et variabilité. Une publication du Consortium, menée en partie par le groupe, montre que CTAO devrait détecter plusieurs centaines de NAG selon leur état d'activité (voir figure 3).

Le groupe développe également `ctaagnvar` un *pipeline* d'analyse de variabilité (amplitude et spectre) basé sur `gammapy` (*Science Tool* officiellement retenu par CTAO pour les futures analyses haut niveau¹), désormais largement utilisé dans le groupe de travail Extragalactique. Il sert notamment à optimiser la stratégie du *large program* de surveillance sur 7 ans d'un échantillon de NAG, afin d'identifier la cadence la plus efficace pour discriminer entre différents modèles de variabilité liés aux processus d'accélération dans les jets relativistes.

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

Chercheuses et chercheurs :

Julien Bolmont, Pablo Correa Camiroaga, Daniel Kerszberg, Jean-Philippe Lenain, Alberto Rosales de Leon

Équipe technique :

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

Doctorantes et doctorants :

Guillaume Grolleron, Anastasiia Mikhno, Ugo Pensec

CHIFFRES CLEFS

60 TB de données de tests NectarCAM stockées sur la grille

124 commits sur `nectarchain`, sur la période 2024-2025

2039 cartes FEB produites et livrées au CEA/Irfu

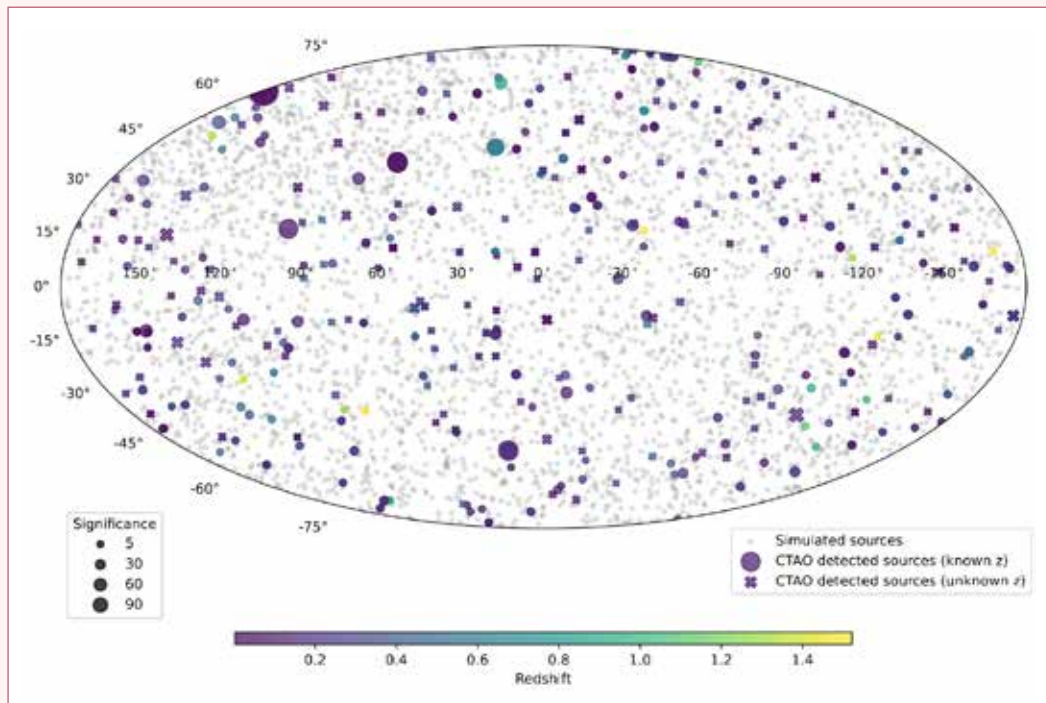


Figure 3 : Carte du ciel montrant la significativité attendue et le redshift des blazars détectables avec CTAO en 20 h d'observation par source dans leur état moyen.

GRAND : the Giant Radio Array for Neutrino Detection

La collaboration GRAND (the Giant Radio Array for Neutrino Detection) vise, dans sa proposition originale, 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 la décennie 2030, ce détecteur 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. Une seule particule de ce type a pu être observée récemment par la collaboration KM3Net. La détection d'un plus grand nombre, avec une meilleure résolution angulaire, sera 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).

La mise en œuvre d'un réseau radio autonome (capable de détecter et identifier les cascades de particules induites dans l'atmosphère par les particules cosmiques à partir des seules impulsions radio associées) est 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 prototypique actuelle, qui 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 (direction d'origine, énergie, nature) des particules cosmiques les ayant initiées.

Les prototypes GRAND

L'outil principal de la phase de prototypage du projet GRAND est GRANDProto300 (GP300), un réseau de 300 antennes en cours de déploiement sur une surface de 200 km² dans une région reculée du désert de Gobi, en Chine (voir photo 1). Dans sa version définitive 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.

Une première phase de l'expérience GP300 a permis d'optimiser le design du détecteur, en particulier sur des aspects de dissipation thermique et de suppression du bruit radio auto-généré. À cette séquence, conclue à l'été 2024, a succédé le déploiement de 65 antennes sur une surface de 20 km², suffisante pour détecter et reconstruire efficacement des gerbes atmosphériques. Une analyse préliminaire a ainsi identifié 41 candidats rayons cosmiques dans les données enregistrées au cours des premières semaines de prises de données de test sur ce réseau de 65 unités. Trois analyses indépendantes, dont deux conduites par des doctorantes et doctorants du LPNHE, ont donné des estimations compatibles sur l'énergie des particules cosmiques à l'origine de 29 de ces événements (voir figure 2 page suivante). Un rayon cosmique a également été observé par le prototype de 10 antennes déployé sur le site de l'Observatoire Pierre Auger en coïncidence avec son réseau de cuves Cherenkov.

L'équipe du LPNHE participe activement aux déploiements et à l'exploitation des prototypes GRAND@Auger et GRANDProto300, pilotés respectivement par nos collaborateurs de l'Université de Radboud (Hollande), et de l'Université de XiDian et du Purple Mountain Observatory (Chine). Notre équipe a pris en charge la gestion des données des deux prototypes (hébergées au centre de calcul de l'IN2P3) et a mis en place le système de monitoring de la qualité des données. Le LPNHE est aussi très fortement impliqué dans l'optimisation du système de déclenchement de l'acquisition de données de GP300 d'une part, et de l'identification et la reconstruction des données d'autre part. L'effort sur l'optimisation du déclenchement recouvre en particulier le projet NUTRIG, co-financé par l'ANR et le DFG, son équivalent allemand. Notre équipe a en particulier développé des



Photo 1 : Une unité de détection sur le site de l'expérience GRANDProto300.

méthodes rapides d'identification des impulsions radio, l'une basée sur l'ajustement de gabarits associés à des impulsions radio de gerbes atmosphériques, l'autre sur un réseau de neurones à convolution. Ces méthodes, appliquées au niveau de l'électronique *Front End* des antennes, permettent un accroissement de plus de 90% de la pureté des données enregistrées par rapport au trigger actuel. Des tests réalisés en conditions réelles en octobre 2025 laissent envisager un déploiement de NUTRIG sur l'ensemble de l'expérience GP300 au printemps 2026. Le travail sur la reconstruction des données, dans la continuité d'un effort entrepris au LPNHE dès 2020, a pour sa part abouti à la construction d'un algorithme (voir figure 3), appelé *Amplitude Distribution Function* (ADF), permettant d'obtenir (sur données simulées) une résolution meilleure que $0,1^\circ$ sur la direction d'origine de rayons cosmiques primaires, et de 15% sur leur énergie.

L'effort du groupe LPNHE porte maintenant sur l'optimisation de l'identification des impulsions de gerbes atmosphériques dans les données GP300 via l'application systématique des algorithmes NUTRIG et ADF

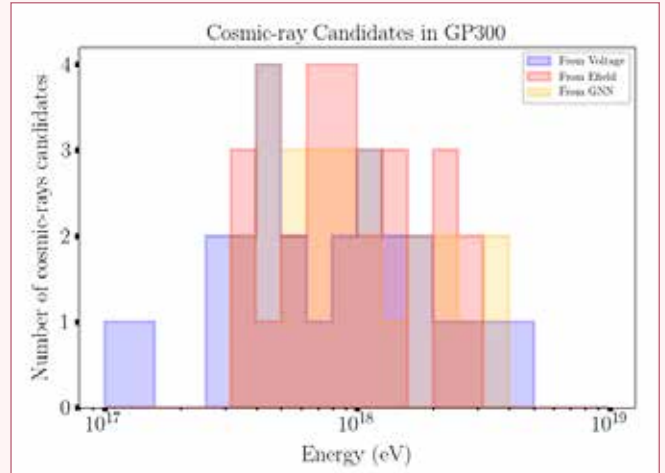


Figure 2 : Distribution en amplitudes des 29 candidats de rayons cosmiques identifiés dans les données du détecteur GRANDProto300 entre janvier et mars 2025 pour les 3 analyses conduites au sein de la collaboration, dont celles de M. Guelfand et A. Ferrière, doctorant.es au LPNHE. D'après Martineau et al. (2025).

sur les données. Ce travail constituera une contribution cruciale à la production du premier spectre de rayons cosmiques de l'expérience GRANDProto300, qui représentera une étape décisive dans l'établissement de la radiodétection comme une méthode autonome et fiable pour la détection et l'étude des gerbes atmosphériques.

Le projet HERON

L'équipe GRAND du LPNHE, en collaboration avec celle de l'IAP (conduite par Kumiko Kotera), de l'Université de Saint-Jacques de Compostelle (Jaime Alva-

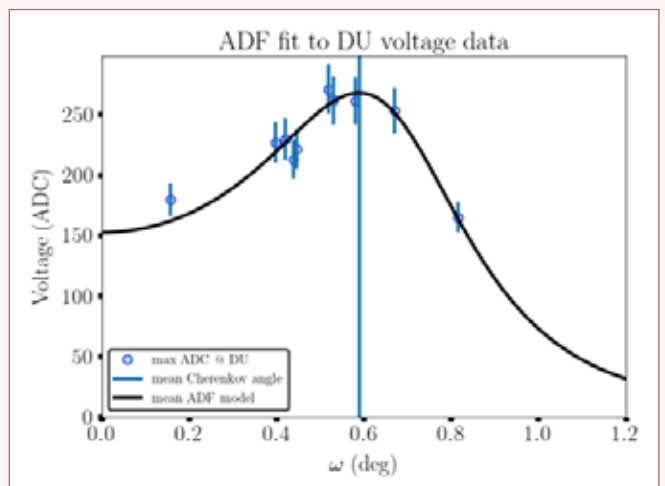


Figure 3 : Amplitude du signal radio en fonction de la distance angulaire à l'axe reconstruit de la gerbe pour l'un des événements identifiés comme une gerbe atmosphérique dans les données de GRANDProto300. La distribution des amplitudes des antennes (cercles bleus) suit la distribution attendue pour un rayon cosmique (courbe noire), avec une nette amplification du signal autour de l'angle Cherenkov. D'après Guelfand et al. (2025).

rez-Muniz) et de Penn State University (Stephanie Wissel) a élaboré le projet HERON (High Elevation Radio Observatory for Neutrinos). HERON combine les atouts de deux approches complémentaires : celle de GRAND, qui repose donc sur un réseau étendu d'antennes radio autonomes, et celle de BEACON, qui utilise une détection interférométrique par un réseau phasé d'antennes rapprochées. En associant ces deux techniques, le dispositif HERON bénéficiera à la fois de la sensibilité accrue du système phasé et de l'excellente capacité de reconstruction et de rejet du bruit de fond de la détection autonome, et pourrait atteindre une sensibilité comparable à un réseau de 10 000 antennes autonomes avec 10 fois moins d'unités. Le projet HERON constitue donc une amélioration remarquable de la proposition initiale de GRAND.

Chercheuses et chercheurs :

Pablo Correa Camiroaga, Olivier Martineau

Équipe technique :

Jean-Marc Colley, François Legrand, Jean-Luc Meunier, Vincent Voisin

Doctorantes et doctorants :

Arsène Ferrière, Marion Guelfand, Nathan Lebas

Il vient d'être sélectionné par le programme ERC Synergy, qui financera au cours des 6 prochaines années la mise au point, la construction et le déploiement de 24 antennes phasées et 360 antennes autonomes dans la province de San Juan (Argentine).

CHIFFRES CLEFS

79 antennes GRAND ont été déployées (65 sur le site GRANDProto300, 10 sur le site de l'Observatoire Pierre Auger, 4 au radiotélescope de Nançay)

490 millions d'événements radio détectés sur GRANDProto300

29 candidats rayons cosmiques identifiés dans la phase de validation de concept de GRANDProto300

14 contributions GRAND + HERON à la conférence ICRC2025

6 ans pour réaliser le projet HERON dans le cadre du programme ERC Synergy

DAMIC-M leader mondial de la recherche de matière noire leptophilique

Depuis 2019 DAMIC-M est 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 début 2022 et deux premières campagnes de prise de données ont eu lieu. Suites à divers événements dont les changements politiques aux USA, l'installation du détecteur final, le projet DAMIC-M proprement dit, a pris un peu de retard et ne sera réalisé qu'au début 2026.

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. Notre objectif, qui

devrait être atteint vers la fin 2028, est 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.

L'atout principal de 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 lectures) 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).

Le financement ERC de DAMIC-M se terminant à l'été 2025 nous avons déposé en collaboration avec IJClab une demande de soutien de l'ANR que nous avons obtenus pour la période 2024-2028. Grâce à ce soutien nous avons embauché deux chercheurs post-doctorants et un doctorant qui vont participer à l'installation du détecteur final et à l'analyse de ses données. Une bourse Marie Skłodowska-Curie a également été octroyé au projet par l'union européenne malheureusement des questions de visas ne vont probablement pas nous permettre d'accueillir la chercheuse iranienne qui en est récipiendaire.

En parallèle le LPNHE a accueilli plusieurs chercheurs américains, Alvaro Chavaria PI du groupe DAMIC-M à l'Université de Washington responsable de l'assemblage final des modules CCD de DAMIC-M a passé un an avec nous. De l'Université de Chicago nous avons accueilli Sravan Munagavalasa sur une bourse Chateaubriand. Finalement Xavier Bertou, chercheur au Centro Atomico Bariloche en Argentine nous a rejoint pour 8 mois en avril 2024 avant d'obtenir un poste de directeur de recherche au CNRS à IJClab dans l'équipe DAMIC-M locale qu'il dirige aujourd'hui.

Technique

La *Low Background Chamber* est un prototype de DAMIC-M qui sert à la fois de démonstrateur et de banc d'essais. Sa configuration est fréquemment mise à jour pour accueillir et tester les pièces et les technologies à déployer dans l'expérience finale. Au cours de la période 2024-2025, l'équipe du LPNHE a été particulièrement impliquée dans l'analyse des données prises avec la LBC en utilisant deux modules de CCD identiques aux modules finaux de DAMIC-M. Par ailleurs nous avons finalisé l'électronique et les *firmwares/softwares* de contrôle du détecteur et d'acquisition. Nous avons en particulier supervisé, testé et validé la fabrication de 56 cartes ACM (*Acquisition Control Module*) qui alimentent, gèrent et acquièrent les CCD ainsi que les modules du système de synchronisation

que nous avons entièrement développés et qui évitent les interférences de lecture entre les différentes CCD. Les performances des ACM ont été validées sur nos bancs de test cryogéniques avec notamment une prise de données de plusieurs jours avec 13 cartes en fonctionnement synchrone. Les études sur le bruit induit par diaphonie sont en cours.

La description détaillée de la LBC, de son fonctionnement et de son utilisation a été publiée en 2024 (*The DAMIC-M Low Background Chamber*, 2024 JINST 19 T11010). Deux modules de 4 CCD de 6144x1536 pixels qui sont identiques aux modules de DAMIC-M ont été installés dans la LBC et nous avons pris des données d'octobre 2024 à janvier 2025. Nous avons également soumis un article décrivant la production de 28 modules du détecteur final (*First Production of Skipper-CCD Modules for the DAMIC-M Experiment*, soumis en septembre 2025). Ces modules sont actuellement au Laboratoire Souterrain de Modane en attente du cryostat en cuivre électro-formé dont les éléments sont en cours de nettoyage au Laboratoire souterrain de Canfranc et qui sera le cœur de DAMIC-M.

Des résultats scientifiques exceptionnels

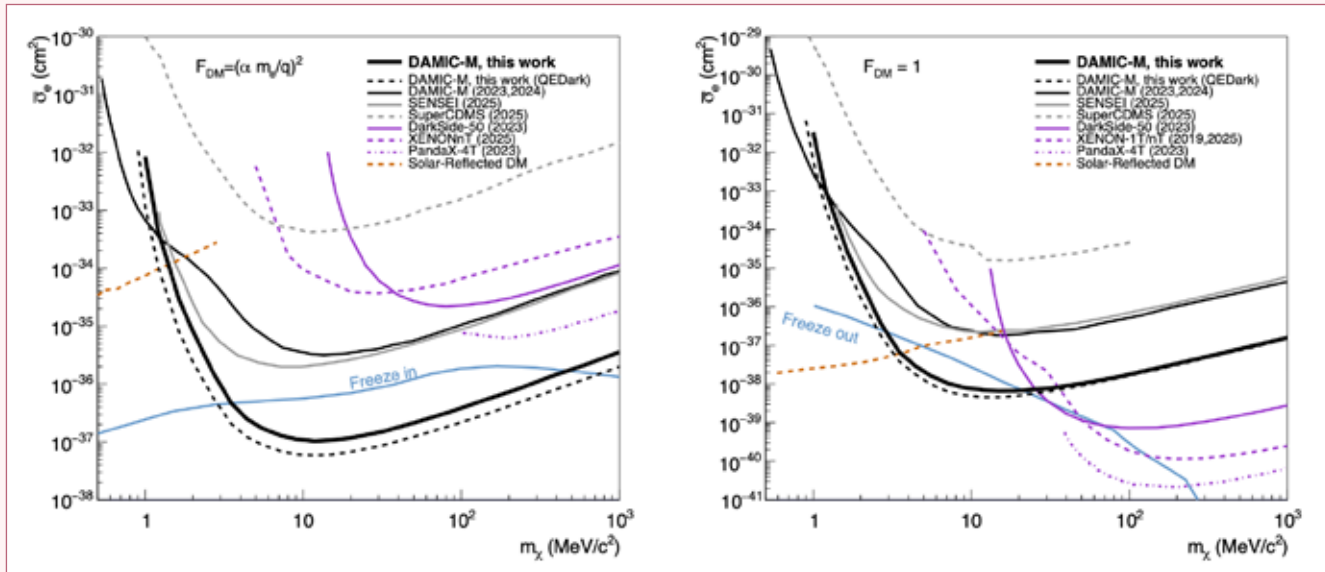
Les premiers résultats des prototypes de DAMIC-M installés dans la LBC ont été publiés en 2023 et 2024, ces premières contraintes, les meilleures du monde à l'époque, avaient démontré l'excellent potentiel de nos détecteurs. Avec l'installation de deux modules CCD de production DAMIC-M dans la LBC en 2024 les nouvelles données nous ont permis d'obtenir des limites de plus d'un ordre de grandeur supérieur ([voir figure page suivante](#)) et également d'exclure de manière définitive certains modèles de matière noire dans la gamme 3-20 MeV qui n'était pas encore couverte par les mesures. Par ailleurs ces limites permettent, pour la première fois, d'exclure que des particules de matière noire interagissant faiblement avec les électrons via un médiateur ultra-léger soient une composante dominante de la matière noire dans l'Univers. Ce résultat a été mis en exergue par *Physical Review Letters* qui l'a publié en juillet 2025 et a suscité un vif intérêt et de nombreuses publications de la part des théoriciens.

À partir de ces mêmes données, nous avons comme en 2023, également réalisé une analyse en modulation journalière qui sera soumise avant la fin 2025. Elle



permet d'améliorer d'un nouvel ordre de grandeur les limites pour des masses inférieures à 2 MeV, mais

ces limites restent toutefois bien au-dessus des prédictions théoriques dans cet intervalle de masse.



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.

Chercheuses et chercheurs :

Claudia de Dominicis, Romain Gaïor, Antoine Letessier Selvon, Paolo Privitera, Nicolas Avalos, Harrys Lumengo, Xavier Bertou

Équipe technique :

Marc Delhot, Romain Gaïor, Yuwei Zhu

Doctorantes et doctorants :

Lounès Iddir

Recherche directe de matière noire avec l'expérience XENONnT

La quête de la matière noire est la raison d'être de l'expérience XENONnT (voir figure 1), située 1400 m sous terre au LNGS en Italie et fondée sur une TPC au xénon diphasique comprenant 5,9 tonnes de xénon. Les interactions dans la phase liquide des particules, usuelles ou potentielles candidates matière noire, y produisent des photons par scintillation (signal primaire S1) et des électrons par ionisation, ces derniers dérivant jusqu'à produire

à leur tour des photons par photoluminescence en phase gazeuse (signal secondaire S2). La combinaison de ces deux signaux détectés dans un ensemble de PMTs permet une localisation précise et une discrimination fine des événements.

La prise de données de XENONnT a commencé en avril 2021. L'expérience a été stoppée à la fin d'une première phase achevée en mars 2025, afin

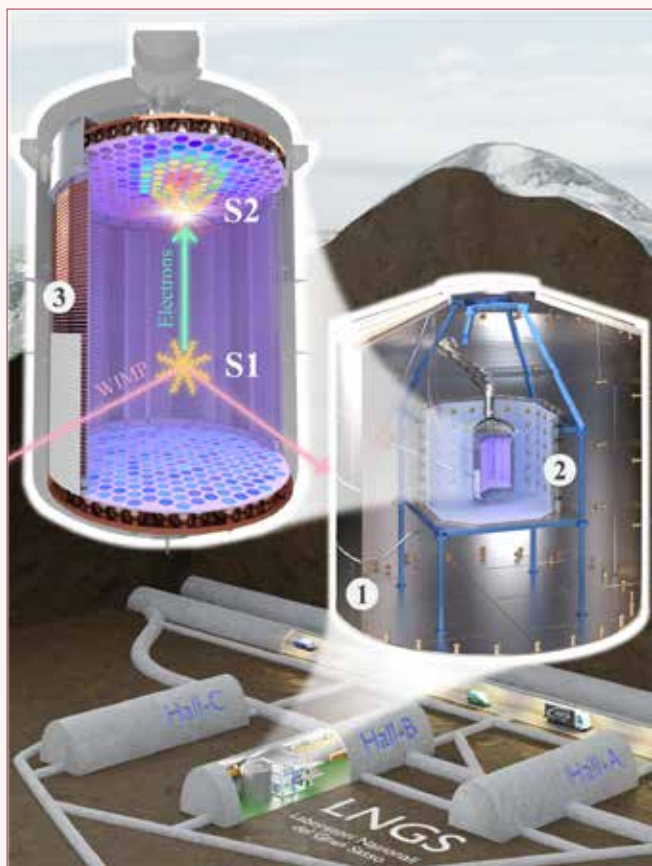


Figure 1 : Vue schématique de XENONnT avec (1) le muon veto (MV), (2) le neutron veto (NV) et (3) la chambre à projection temporelle (TPC).

de permettre l'installation de nouvelles électrodes qui amélioreront considérablement l'efficacité, notamment grâce à l'augmentation du gain S2 et de l'extraction en phase gazeuse. Toutes les opérations de remplacement des électrodes se sont déroulées suivant le calendrier le plus optimiste et le détecteur est à nouveau fermé, dans l'attente du remplissage final avec du xénon liquide, puis du démarrage d'une nouvelle prise de données qui devrait intervenir début 2026.

L'expérience a poursuivi l'analyse sur les données enregistrées et publié de nombreux articles dans des revues à comité de lecture, dont plusieurs résultats à la pointe au niveau mondial, aussi bien en terme de technologie que de physique proprement dite.

XENON1T

Les derniers résultats de XENON1T (le détecteur de précédente génération, dont la prise de données s'est achevée fin 2018) ont été publiés en 2024 et concernent le développement d'une nouvelle méthode de réduction

des bruits de fond liés à l'activité du radon, qui pourrait également être utile dans XENONnT, ainsi que l'obtention de limites d'exclusion de la matière noire dans le cadre de nouvelles théories.

Techniques de détection et d'analyse

L'efficacité de détection des neutrons par le *Neutron Veto* (NV), qui rejette ceux susceptibles d'imiter des signaux de matière noire, a atteint $(82 \pm 1)\%$, la plus élevée jamais mesurée pour un détecteur Cherenkov à eau, et ce uniquement avec de l'eau déminéralisée, avant l'ajout de gadolinium. La perte de temps de vie de l'expérience est ainsi limitée à seulement 1,6 %.

La purification du xénon liquide a permis d'atteindre un niveau exceptionnellement bas de radioactivité provenant du radon de $0,9 \mu\text{Bq kg}^{-1}$, presque un facteur 2 par rapport au niveau déjà record atteint il y a 2 ans et un facteur 5 meilleur que les expériences concurrentes.

XENONnT a publié de façon complètement transparente l'ensemble des techniques utilisées pour ses résultats de physique (de la reconstruction puis la sélection des données aux méthodes statistiques en passant par la simulation du détecteur), tous issus d'une analyse en aveugle.

Publications de physique

Grâce au flux de neutrinos ^8B issus du soleil, XENONnT a réalisé la première mesure de la diffusion élastique cohérente de neutrinos sur noyau (CEvNS) dans le cas d'une source astrophysique, en accord avec les prédictions du Modèle Standard.

XENONnT a recherché la LDM avec des reculs nucléaires, mais aussi électroniques aux énergies les plus basses. Dans le premier cas, la sensibilité a atteint pour la première fois le niveau du "brouillard de neutrinos" (voir figure 2 page suivante), où les neutrinos deviennent indiscernables de la LDM. Dans le deuxième, des contraintes inédites ont pu être posées sur de nombreux modèles de matière noire électronique avec divers médiateurs, notamment des particules de type "axion-like" ou "dark photon". Dans les deux cas, XENONnT a établi les meilleures limites mondiales sur les interactions de matière noire légère.

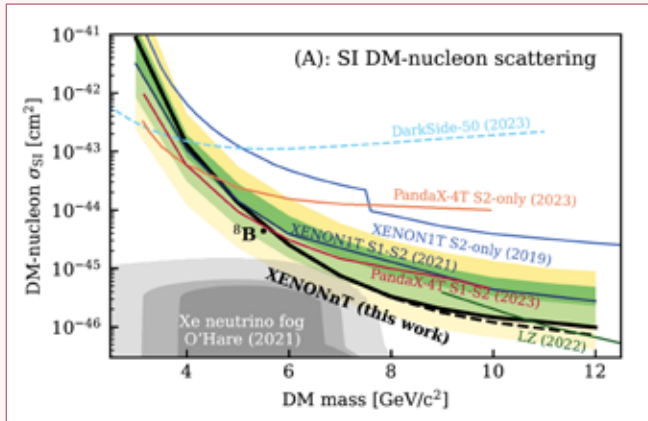


Figure 2 : Limite à 90% de niveau de confiance sur la section efficace DM-nucléon dans le cas d'une interaction indépendante du spin (SI). Les zones grisées montrent la contribution attendue des neutrinos dans le Modèle Standard. Voir Phys. Rev. Lett. 134, 111802 (2025), arXiv:2409.17868 pour plus de détails.

Avec 3,1 tonne×année de données, XENONnT a présenté sa recherche la plus sensible de WIMPs à ce jour. Aucun signal n'ayant été observé, l'expérience a amélioré d'un facteur presque 2 ses précédents résultats.

Contributions du LPNHE

Impliquée dans le projet XENON depuis dix ans, l'équipe du LPNHE y contribue sur quatre axes complémentaires, tout en coordonnant les groupes de travail sur le stockage du xénon liquide et sur le traitement informatique des données, ainsi que le groupe d'analyse de signal d'ionisation de faible énergie (S2-only).

L'équipe est responsable du bon fonctionnement de tout le système de gestion (traitement, stockage et distribution) des données, assuré par un logiciel qu'elle a développé et qui interface le système d'acquisition et les outils de gestion (cf. RUCIO, développé par le CERN) sur la grille. L'équipe a également développé un système de suivi hors-ligne de qualité des données et contribue à l'amélioration des logiciels de traitement.

Sur XENONnT, comme sur XENON1T auparavant, l'équipe a principalement travaillé sur la recherche de matière noire leptophile sub-GeV où le signal d'ionisation attendu est de l'ordre de quelques électrons. Grâce à de nouvelles et nouveaux doctorants, le groupe a pu élargir l'éventail de recherche à la physique du neutrino, notamment la détection de la diffusion cohérente élastique des neutrinos solaires ^8B et la détection de supernovæ galactiques.

L'équipe travaille sur la simulation du signal S2, qui a été décrit de manière beaucoup plus réaliste pour tenir compte en particulier de la focalisation des électrons vers les fils d'anode. La carte de réponse des PMTs au signal S2 en fonction de la position ainsi obtenue, incluant également tous les effets expérimentaux connus (réponse individuelle des PMTs, variation en fonction de l'angle d'incidence, etc.), a été intégrée au code officiel pour permettre une simulation à la fois rapide et fidèle.

Par ailleurs des études ont été réalisées avec le logiciel de simulation multiphysique COMSOL, 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.

Les équipes de XENON, DARWIN et LZ se sont réunies au sein de la collaboration XLZD pour construire le détecteur de prochaine génération, comprenant 50 tonnes de xénon liquide et dédié à la recherche de matière noire, mais aussi à l'étude des diverses sources de neutrinos astrophysiques (solaires, atmosphériques et de supernovæ) ainsi qu'à la recherche de la double décroissance bêta sans neutrino. Le LPNHE, impliqué de longue date, est très visible dans le groupe de travail qui a conçu le futur système de stockage du xénon liquide, et coordonne présentement le groupe sur le calcul.

L'équipe a achevé de construire XeLab (voir photo 3), une version réduite de XENON dotée d'une petite TPC et de sa cryogénie. Son objectif principal est de tester de nouvelles électrodes "flottantes" pour résoudre les limitations rencontrées dans les TPC actuelles, qui deviendraient critiques avec l'augmentation d'échelle. XeLab permet aussi de mettre en œuvre deux systèmes de refroidissement à l'azote liquide, de mesurer et contrôler les paramètres (pression, température, débit, etc.) du détecteur, enfin d'étudier la production d'électrons isolés afin de chercher à la réduire via de nouveaux matériaux.

L'équipe technique a réalisé la structure mécanique et son système de levage, le système de hautes tensions, l'ensemble (matériel/logiciel) du système d'acquisition des données et de suivi du détecteur, basé sur des RevPI. La TPC (voir photo 4), fournie par Subatech, Nantes, a été mise en service début 2025, ce qui a



Photo 3 : Vue du dispositif expérimental XeLab, avec de gauche à droite, le réservoir d'azote liquide, le cryostat incluant la TPC, le système de purification et de stockage du xénon et le système d'acquisition des données et d'alimentation des hautes tensions.

permis de valider l'ensemble cryogénie-TPC-PMTs-acquisition, puis d'effectuer les premières calibrations des hautes tensions. XeLab, désormais pleinement opérationnel, servira à qualifier rapidement le concept d'électrodes flottantes en vue de la future génération de détecteurs.

Ce projet a augmenté notablement notre visibilité à l'international, notamment avec l'Allemagne (IRL DMLab) et l'Australie (échanges d'étudiantes et d'étudiants).

CHIFFRES CLEFS

Radioactivité provenant du radon de **$0,9 \mu\text{Bq kg}^{-1}$**

8 PB de données traitées, transférées et stockées

Limite d'exclusion de section efficace SI DM-nucléon de **$2,5 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$** à 90% de niveau de confiance pour une masse de **$6 \text{ GeV}/c^2$** , au niveau du "brouillard de neutrinos"



Photo 4 : La TPC de XeLab.

Chercheuses et chercheurs :

Bernard Andrieu, Frédéric Girard, Luca Scotto Lavina, Yajing Xing

Équipe technique :

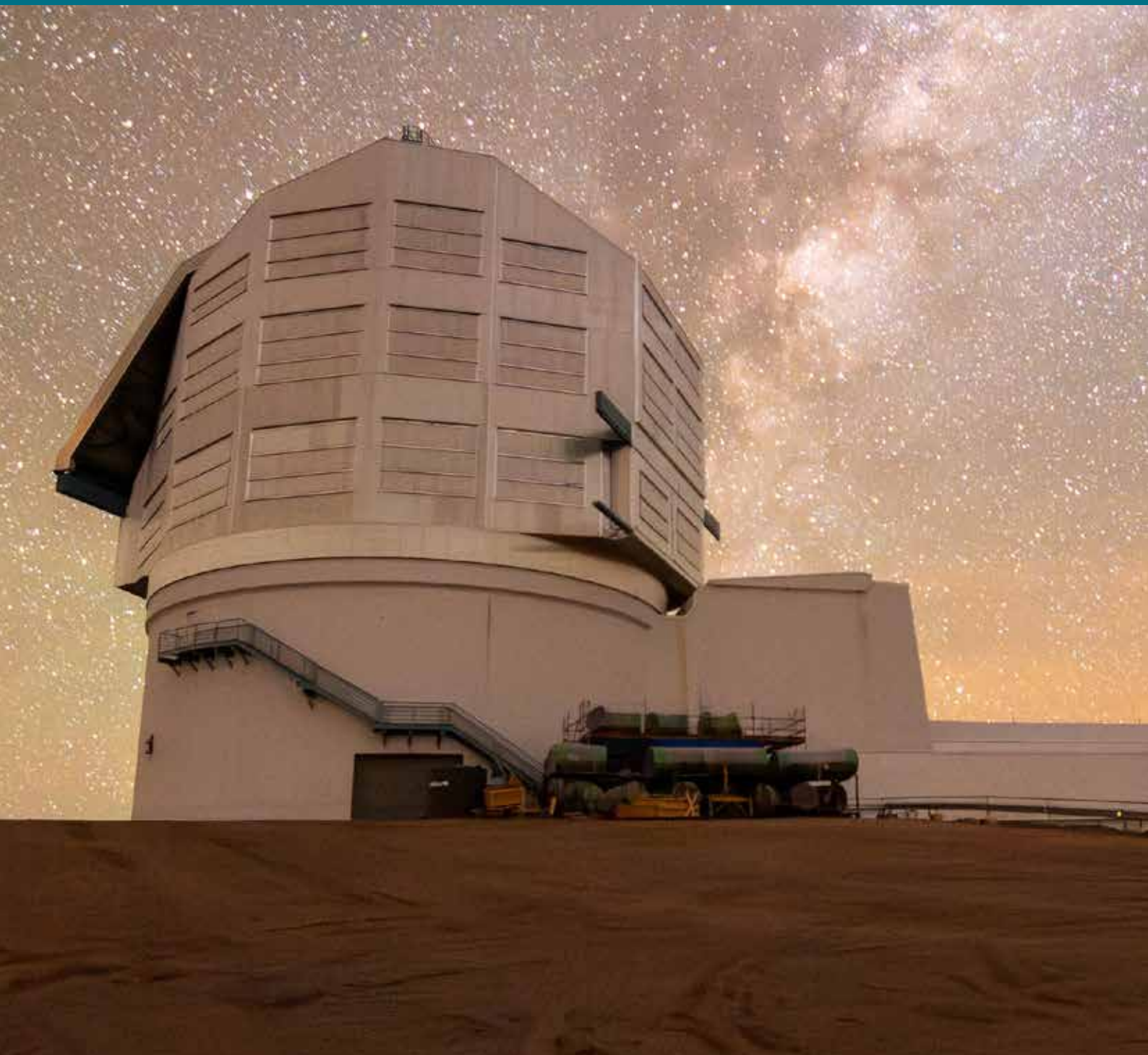
Sébastien Colinot, Olivier Dadoun, Fabien Frérot, Romain Gaïor, Nabil Garroum

Doctorantes et doctorants :

Veronica Cazzola, Daniel Layos Garcia, Yongyu Pan, Quentin Pellegrini

Cosmologie

- **Première lumière de l'observatoire V. Rubin**
 - Mesure du cisaillement gravitationnel
 - Réalisations techniques
 - *Commissioning* du plan focal de LSST
 - Le système changeur de filtre de LSST
- **Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP**
 - Le relevé photométrique StarDICE
 - Développement et démonstration des *Collimated Beam Projector*
- **Le projet Lemaître : une mesure indépendante de l'évolution de l'équation d'état de l'énergie noire**
- **Contraindre la cosmologie avec la cartographie tridimensionnelle des grandes structures de l'univers obtenue par DESI**
 - Introduction
 - Analyse standard
 - Au-delà des méthodes standard
 - Contributions techniques pour la deuxième phase de DESI, DESI-II
- **Cisaillement cosmique**
- **Théorie de la formation des structures cosmologiques**



Cosmologie

L'équipe de cosmologie du LPNHE concentre son activité sur l'étude de l'énergie noire. L'énergie noire est la composante de l'univers à laquelle on attribue l'accélération de l'expansion, découverte il y a un peu plus de 25 ans. L'expansion accélérée de l'univers était alors apparue comme une grande surprise, voire avait suscité quelque scepticisme. En effet, dans un univers rempli, ou au moins dominé par la matière, celle-ci se dilue avec l'expansion, le taux d'expansion décroît avec le temps et l'expansion décélère. Dans le cadre de la relativité générale, pour que l'expansion s'accélère, il faut ajouter un fluide cosmique dont la densité décroît peu ou pas avec le temps, que l'on a appelé "énergie noire", et dont on ne sait à peu près rien, sinon qu'il est absent du modèle standard de la physique des particules. Depuis lors, contraindre la nature de l'énergie noire, c'est d'abord mesurer l'évolution de sa densité avec le temps, en pratique indexé par le décalage spectral ou *redshift*. Mesurer la relation entre distance et *redshift* contraint directement l'histoire de l'expansion de l'univers, qui elle-même dépend de l'évolution de la densité totale (énergie noire, radiation et matière noire et baryonique), ce qui contraint in fine la composition. Ce sont ces mesures de l'histoire de l'expansion qui ont fourni l'essentiel des contraintes sur l'énergie noire.

Durant les 20 ans suivant la découverte de l'expansion accélérée, les mesures ont de plus en plus conforté l'hypothèse que la densité d'énergie noire est statique, et joue le même rôle qu'une "constante cosmologique", un terme introduit par Einstein dans la relativité générale puis laissé de côté pendant trois quarts de siècle. L'univers contiendrait donc aujourd'hui de l'énergie noire statique (appelée Λ) et de la matière noire dite "froide" (CDM) ainsi qu'un peu de matière ordinaire dite "baryonique". L'énergie noire représenterait aujourd'hui 70 % de la densité totale, le reste étant de la matière. Ce modèle appelé Λ CDM est devenu ainsi le modèle "standard" cosmologique.

Ce modèle est soutenu par un grand nombre d'observations solides utilisant des sondes différentes, affectées par de potentielles erreurs systématiques différentes. Historiquement, la découverte de l'accélération a utilisé les supernovæ de type Ia, explosions d'étoiles très brillantes et de luminosité reproductible, dont l'éclat apparent indique donc la distance. Le laboratoire a été impliqué dans la découverte et l'équipe

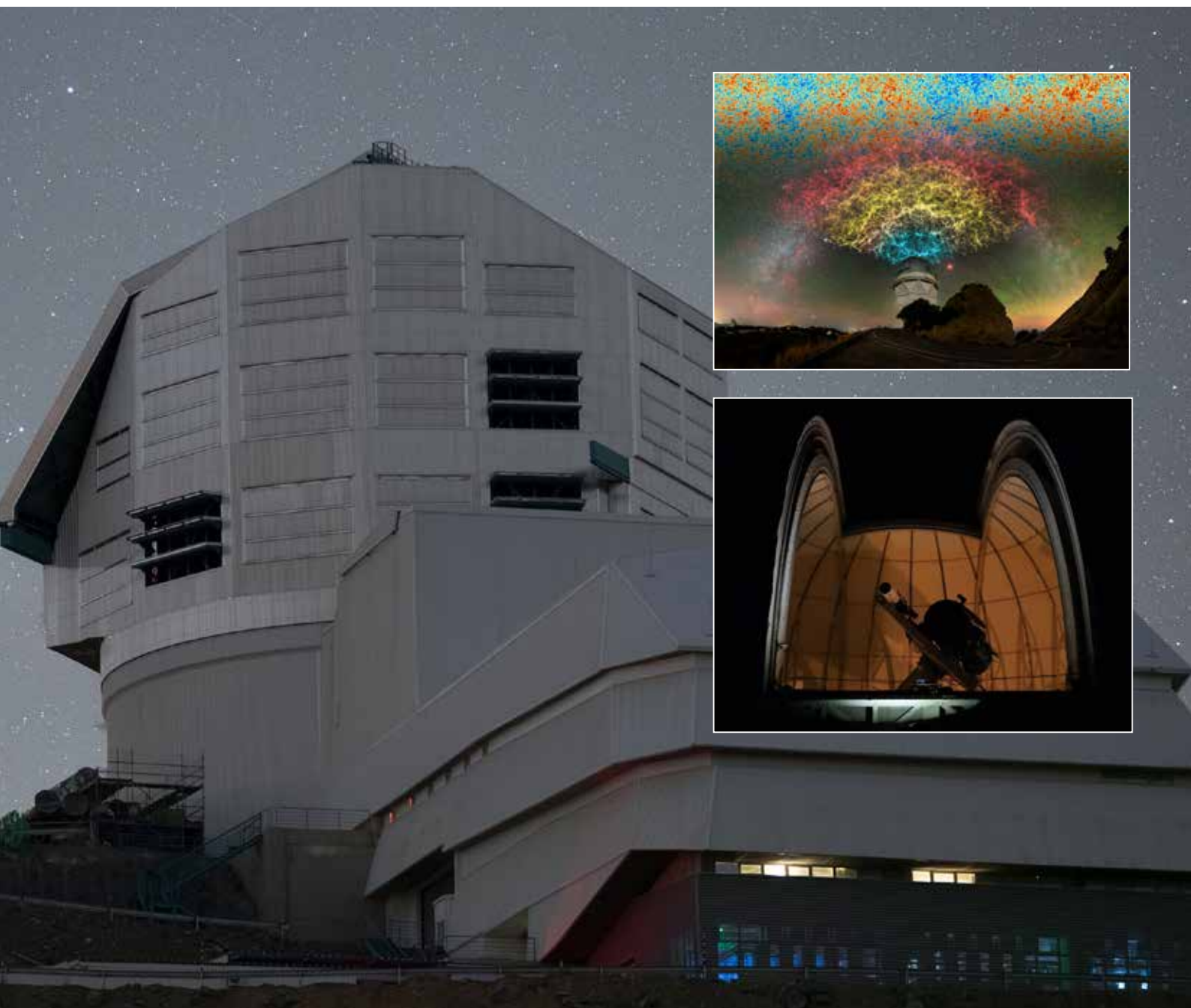
a développé cette sonde en déployant des méthodes d'analyse novatrices et largement utilisées depuis par la communauté. La mesure des distances aux supernovæ continue aujourd'hui au laboratoire à travers le projet "Lemaître" décrit plus bas. On appelle les supernovæ des "chandelles standard" et l'on peut aussi mesurer des distances à l'aide d'une "règle standard", constituée par une distance particulière qui présente un excès de corrélation des fluctuations de matière (le plus souvent, des galaxies). Cette règle standard reflète les oscillations acoustiques des baryons dans l'univers (BAO en anglais). Cette sonde nécessite de mettre en place des relevés massifs destinés à obtenir en masse des redshifts de galaxies. C'est l'objet du relevé DESI, discuté plus loin, dans lequel le laboratoire est impliqué.

Il y a environ deux ans le modèle cosmologique standard a été mis en défaut par l'analyse de la première année de DESI, jointe à des échantillons de supernovæ, et de contraintes venues du fond diffus cosmologique : la densité d'énergie noire pourrait varier au cours du temps et d'une manière inattendue, la densité croissait dans le passé et décroît aujourd'hui. Ce résultat a été confirmé par l'analyse de 3 ans de DESI, mais conserve une signification statistique modeste.

Confirmer ou infirmer ce résultat est une question pressante, que les projets en cours choisissent naturellement comme but au moins à court terme. Au laboratoire, on trouve trois axes de recherche susceptibles de fournir de nouvelles contraintes. D'abord DESI et sa continuation aujourd'hui décidée. Ensuite, le projet Lemaître a la sensibilité pour fournir une indication utile sur ce sujet, en utilisant des lots de supernovæ entièrement nouveaux, et en éliminant soigneusement de nombreuses sources potentielles d'erreurs systématiques. Finalement, le laboratoire est impliqué dans le projet Rubin et participe depuis plus de 15 ans à la construction de ce grand télescope, construit pour conduire la mesure du cisaillement gravitationnel à une échelle "industrielle". Avec ce télescope, qui a vu sa première lumière en avril 2025, on peut en un an de relevé fournir une contribution essentielle à la mesure de l'énergie noire, pourvu que l'on affine suffisamment les méthodes, un projet enthousiasmant et difficile. L'équipe a donc pris position pour contribuer de manière essentielle aux prochaines contraintes sur l'énergie noire.

Expliquer l'accélération de l'expansion par l'introduction de l'énergie noire dans la composition de l'univers, c'est se conformer aux équations de la relativité générale. Si cette théorie est excellemment testée aux échelles spatiales du système solaire, on peut imaginer qu'elle est inadaptée aux échelles cosmologiques. Cette hypothèse de "gravité modifiée" est difficile à tester avec les mesures de distance, puisqu'on ne peut à la fois contraindre la nature des sources de gravitation et la relation entre les sources et les effets observés. En revanche, une fois fixée la composition de l'univers à l'aide des mesures de distance et de la relativité générale, cette dernière prédit de manière unique l'évolution des contrastes de densité aux grandes

échelles spatiales. Si les observations s'écartent des prédictions, la relativité générale est mise en échec aux grandes échelles spatiales, et on devrait alors tenter de modifier la gravité pour expliquer l'accélération plutôt que d'ajouter une nouvelle source inconnue et embarrassante. Les trois sondes évoquées au-dessus, supernovæ, relevé 3D de galaxies, et mesure du cisaillement gravitationnel permettent toutes de contraindre le taux de formation des structures et donc de le comparer à la prédiction de la relativité générale déduite de l'histoire de l'expansion. Sur ce sujet aussi, nos programmes en cours promettent des avancées très significatives à court et moyen terme.



Première lumière de l'observatoire V. Rubin

Réalisations techniques

Avec l'arrivée de la caméra LSST au Chili en mai 2024, puis la collecte des premiers photons par l'observatoire V. Rubin en avril 2025, le groupe s'est engagé activement dans le *commissioning* de la caméra LSST ainsi que dans la préparation de la calibration du relevé LSST. On peut ainsi souligner que, pour la période allant d'avril 2024 à fin 2025, le cumul des déplacements des membres du laboratoire représente un peu plus de onze mois de missions au Chili. Cette mise en service de l'observatoire V. Rubin couronne un effort majeur du laboratoire et du groupe de cosmologie, effort engagé dès décembre 2006.

Commissioning du plan focal de LSST

Au-delà de sa participation au *commissioning* du plan focal, et en particulier à sa caractérisation, le groupe a joué un rôle central en 2025 dans la mise au point de nouveaux codes de lecture des CCD afin d'en optimiser la réponse. On peut notamment souligner un effort de fond visant à stabiliser la réponse des capteurs (gain et biais) à des niveaux inégalés pour des CCD — avec une stabilité du gain meilleure que 10^{-4} sur une nuit — ainsi qu'à minimiser les covariances parasites entre pixels, qui nuisent à l'estimation et à la correction des distorsions de forme induites par les capteurs. Ce dernier point jouera un rôle clé dans la future mesure du cisaillement gravitationnel.

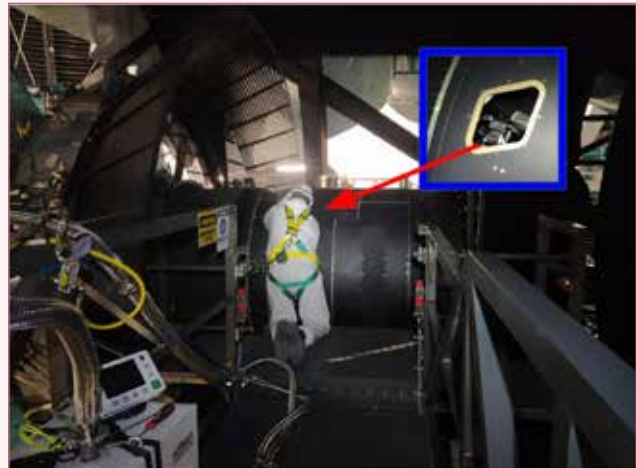
Le système changeur de filtre de LSST

Afin de mesurer les couleurs des objets astronomiques — information clé pour l'estimation de leur distance — les imageurs collectent la lumière à travers des filtres sélectionnant différentes bandes du spectre. LSST observe ainsi le ciel successivement dans six bandes couvrant le domaine visible

et proche infrarouge, de 330 à 1045 nm. Le système changeur de filtre permet de déplacer ces filtres (d'un diamètre d'environ 70 cm et d'un poids compris entre 25 et 38 kg chacun) depuis une position d'attente vers la position dans le faisceau optique, et réciproquement. Ces mouvements sont rapides (moins de 90 secondes) afin de minimiser les temps morts, précis — les filtres sont positionnés de manière reproductible à mieux que 100 microns — et fiables : près de 100 000 changements de filtre sont prévus sur la durée du projet. La France, via l'IN2P3, a fourni le système changeur de filtre de LSST, et le LPNHE a réalisé le « carrousel », système assurant le stockage des filtres en attente et la présentation du filtre à positionner dans le plan focal. Le carrousel, d'une masse d'environ 250 kg à vide, est un système extrêmement robuste, capable de maintenir en toute sécurité environ 155 kg de filtres tout en intégrant les risques sismiques importants au Chili. Une quarantaine de personnes ont contribué à la construction du changeur de filtre au sein de cinq laboratoires de l'IN2P3 : CPPM, LPC, LPSC, APC et LPNHE. En particulier, une quinzaine de personnes issues des services techniques du LPNHE ont participé à ce projet depuis fin 2006. Avec la mise en service de la caméra sur le ciel, le groupe a participé activement à la montée en puissance du changeur de filtre grâce à une forte présence au Chili et à un support assuré 24 h/24 et 7 j/7 d'avril à décembre 2025. Durant cette période, le travail accompli a permis de réduire le taux d'erreur nécessitant une intervention humaine, passant d'une erreur tous les 20 changements de filtre à moins d'une erreur pour mille changements. Depuis avril 2025, près de 2 500 changements de filtre ont été effectués, avec des pics atteignant jusqu'à 42 changements par nuit. Des défauts de jeunesse du carrousel ont été identifiés et corrigés au cours de ces premiers mois d'exploitation, renforçant ainsi la fiabilité et la répétabilité de ces opérations.



Télescope LSST et les Pléiades.



Maintenance du carousel dans l'enveloppe de la caméra, alors que la caméra est sur le télescope, octobre 2025.

Chercheuses et chercheurs :

Pierre Antilogus, Pierre Astier, Sylvain Baumont, Marc Betoule, Sébastien Bongard, Laurent Le Guillou, Delphine Hardin, Jérémy Neveu, Anna Niemiec, Nicolas Regnault

Équipe technique :

Guillaume Daubard, Claire Juramy, Didier Laporte

Doctorantes et doctorants :

Yassine Faris, Enya Van den Abeele

CHIFFRES CLEFS

2500 : changements de filtre pendant les 6 premiers mois de *commissioning* de la caméra LSST.

0,58" : Record de qualité d'image obtenu le 17 décembre (FWHM de la PSF médiane sur tout le champ)

Étalonnage photométrique du diagramme de Hubble avec StarDICE et CBP

Le démarrage du relevé du Vera Rubin Observatory en 2026 va permettre de constituer un diagramme de Hubble peuplé de plusieurs dizaines de milliers de supernovæ. 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'énergie noire de 1 pourcent. Ceci implique toutefois d'être en mesure de mesurer les rapports de flux apparent entre les supernovæ proches (dans le visible) et les supernovæ lointaines (dans l'infrarouge) sans introduire d'erreurs systématiques plus grandes que l'effet de 2 millièmes recherché. L'étalonnage des flux sur un domaine de longueur d'onde couvrant 300-1100 pour permettre de couvrir le domaine de redshift de $z=0,1$ à $z=1$ 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. Le groupe de cosmologie du LPNHE investit un important effort instrumental dans la quête d'une précision photométrique suffisante en portant l'expérience de calibration photométrique StarDICE et le développement du *Collimated Beam Projector* (CBP). La combinaison de ces deux instruments, le premier visant à transférer l'étalonnage des flux lumineux définis par le radiomètre cryogénique du NIST sur des étoiles, le second à mesurer précisément les bandes passantes des instruments ZTF et LSST, devrait permettre de briser cette barrière.

Le relevé photométrique StarDICE

L'expérience StarDICE est la combinaison de trois dispositifs instrumentaux. Premièrement, un télescope robotique de 40 cm de diamètre installé à l'Observatoire de Haute-Provence, dont le rôle est de mesurer précisément le flux de 3 étoiles standards dans les bandes *ugrizy* de LSST. Ces étoiles servent de références pour tous les relevés de supernovæ. Deuxièmement, une étoile artificielle également installée à l'Observatoire de Haute Provence (OHP) à

110 m du télescope StarDICE. C'est une source de lumière très faible et de luminosité connue permettant de mesurer directement sur site la transmission du télescope robotique. Troisièmement, un banc d'étalonnage installé au LPNHE, qui permet l'étalonnage de la quantité de lumière délivrée par l'étoile artificielle avant son transfert sur site.

Fruit de quatre ans et demi de travail, l'installation robotique StarDICE a été complétée en juillet 2024 avec l'installation de l'étoile artificielle en regard du télescope (voir photo 1). L'expérience a effectué un premier relevé de 70 nuits. L'analyse est en cours dans l'objectif d'établir pour la première fois une calibration instrumentale pour le diagramme de Hubble du projet Lemaître. Pour atteindre le niveau de précision requis pour Rubin, un développement R&D a démarré pour qualifier la stabilité d'une plateforme drone susceptible de porter l'étoile artificielle. La mise à disposition de ce type de technologie permettrait de simplifier les observations, d'annuler les incertitudes introduites par l'atmosphère sur la ligne de calibration et de rendre la mesure possible pour d'autres télescopes que StarDICE.



Photo 1 : Au premier plan l'étoile artificielle StarDICE protégée par son enceinte cylindrique. L'enceinte s'ouvre la nuit pour que l'étoile artificielle serve d'étalon au télescope robotique abrité par la première coupole à gauche au deuxième plan.

Développement et démonstration des *Collimated Beam Projector*

L'établissement de références de flux précises ne suffit pas pour interpréter les mesures photométriques. Une connaissance parfaite des bandes

passantes des instruments effectuant les relevés est également nécessaire. Le développement conjoint, au sein de StarDICE, d'un *Collimated Beam Projector* (CBP) avec le groupe de Harvard a conduit à la publication, en 2024, de la première démonstration de la mesure intégrée des bandes passantes d'un télescope avec une précision en longueur d'onde meilleure que 0,2 nm. Cette mesure a été effectuée sur le télescope StarDICE avant son installation à l'OHP et bénéficiait de l'environnement privilégié du laboratoire. Les développements continus sur la source de lumière ont permis le développement d'une version transportable capable de mesurer les transmissions des télescopes sur site. En 2025, le CBP a ainsi mesuré la transmission du Samuel Oschin Schmidt Telescope (ZTF) à l'observatoire du Mont Palomar, puis a confirmé la mesure originale du télescope StarDICE à l'OHP. L'instrument voyagera au *Vera Rubin Observatory* (Chili) en 2026 pour mesurer LSST et son télescope auxiliaire.

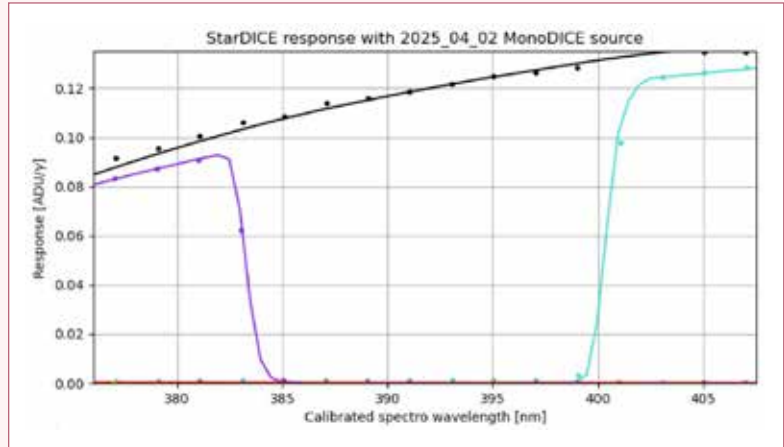


Figure 2 : Comparaison de deux mesures des courbes de transmissions des différentes bandes du télescope StarDICE. La première (trait plein) effectuée en 2022 en laboratoire avant l'installation de l'instrument avec la première version du CBP. La seconde (points) effectuée sur site en 2025 avec la version transportable du CBP. L'accord dans les incertitudes entre les deux mesures effectuées à plusieurs années d'intervalle et soumises à des incertitudes systématiques différentes confirme à la fois la stabilité de l'instrument StarDICE et la qualité des deux mesures.

Chercheuses et chercheurs :

Marc Betoule, Sébastien Bongard, Laurent Le Guilloux, Jérémy Neveux, Enya Van den Abeele

Équipe technique :

Éduardo Sépulveda, Fabien Frérot, Charlotte Georget

Doctorantes et doctorants :

Thierry Souverin

CHIFFRES CLEFS

115 000 : Le nombre d'images prises pendant le relevé 2024-2025.

35 : Le nombre de nuits photométriques.

0,2 nm : L'écart entre 2 mesures des bandes passantes de l'instrument photométrique StarDICE espacées de 3 ans.

Le projet Lemaître : une mesure indépendante de l'évolution de l'équation d'état de l'énergie noire

L'étude de l'histoire de l'expansion cosmique donne accès à la nature des principaux constituants de l'Univers : la matière baryonique (dont nous sommes constitués), la matière noire de nature inconnue et l'énergie noire, constituant mystérieux, dont l'exis-

tence a été postulée afin d'expliquer l'accélération de l'expansion.

Deux sondes observationnelles ont permis de poser des contraintes précises sur l'histoire de l'expansion.

La première consiste à utiliser une classe d'explosions stellaires très homogènes, appelées supernovæ de type Ia (SNe Ia), afin de contraindre la relation entre "distance de luminosité" et décalage spectral. C'est la sonde historique qui a permis de découvrir l'accélération de l'expansion cosmique et aujourd'hui encore, elle demeure la technique la plus efficace statistiquement, en particulier dans l'Univers proche ($z < 0,1$) et intermédiaire ($0,1 < z < 0,7$), là où s'est produite la transition entre expansion décélérée et accélérée au moment où l'énergie noire a pris le dessus sur la matière. La seconde technique consiste à étudier la relation entre "distant angulaire" et décalage spectral, en utilisant la règle standard donnée par les oscillations acoustiques des baryons (BAO). L'équipe du laboratoire est impliquée dans ces deux sondes : les supernovæ via les *surveys* SNLS/SNfactory, Subaru, ZTF et dans un futur proche, LSST, et les BAO, via notre participation à SDSS/BOSS et maintenant DESI.

Récemment, deux études ont mis en évidence une possible évolution de l'équation d'état de l'énergie noire au cours de l'histoire de l'Univers. Si cette découverte était confirmée, il s'agirait là d'un fait d'une importance capitale, impliquant une déviation radicale d'avec le modèle standard de la cosmologie (Λ CDM).

L'équipe de cosmologie du laboratoire est engagée dans le projet Lemaître, un effort d'analyse conjointe de lots de données supernovæ inédits et complémentaires : à bas redshift ($z < 0,1$), 3500 supernovæ découvertes et suivies par la Zwicky Transient Facility (ZTF), aux *redshifts* intermédiaires ($0,3 < z < 0,8$), 172 supernovæ découvertes durant les deux dernières années du *survey* SNLS, et à très haut redshift ($0,5 < z < 1,2$), 400 supernovæ découvertes et suivies avec la caméra Hyper Suprime-Cam, montée sur le télescope Subaru de 8,2 mètres. 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 précédée.

Le cœur du projet Lemaître consiste en un effort d'analyse intégré de ces trois lots de données. Comme le signal à mesurer est extrêmement ténu, il est essentiel d'atteindre une précision de l'ordre du pour-mille dans chaque intervalle de *redshift*. Cela a impliqué notamment (1) un contrôle au niveau du pour-mille non seulement des algorithmes de mesure des flux mais aussi

de la réponse des caméras des trois *surveys*, (2) un effort instrumental pour re-mesurer in-situ les filtres des télescopes ZTF et MegaCam(SNLS) et (3) la construction d'une chaîne de métrologie des flux redondante reliant chaque supernova aux standards de flux primaires utilisés en astronomie.

En parallèle de cet effort instrumental, le projet a entrepris une réécriture complète de la chaîne d'analyse permettant d'inférer les paramètres cosmologiques à partir des mesures photométriques des supernovæ. L'objectif est de simplifier et d'accélérer au maximum le processus d'inférence, afin de le rendre pleinement testable à grande échelle sur de nombreuses réalisations simulées des jeux de données. Cette nouvelle chaîne repose sur deux codes principaux.

Le premier est un code de modélisation empirique de l'évolution spectrophotométrique des supernovæ de type Ia : le projet NaCl (Nouveaux Algorithmes de Courbes de Lumière). NaCl a été conçu pour simplifier autant que possible la procédure d'entraînement du modèle et, surtout, pour permettre une propagation rigoureuse des incertitudes affectant les paramètres d'intérêt — luminosité *rest-frame* au maximum, vitesse d'évolution de la courbe de lumière et couleur *rest-frame* — à partir desquels sont estimées les distances standardisées.

Le second est un code dédié à l'estimation des distances de luminosité standardisées intégrant explicitement les biais de sélection affectant les échantillons observés : le projet EDRIS (Estimation de Distances pour les Relevés Incomplets de Supernovæ). EDRIS combine les paramètres fournis par NaCl en un estimateur de distance unique et optimal, et réalise l'inférence cosmologique en tenant compte des biais de sélection propres à chacun des échantillons.

La chaîne NaCl+EDRIS fait actuellement l'objet de tests approfondis dans le cadre de plusieurs *Data Challenges* de difficulté croissante. Chaque *Data Challenge* comprend de l'ordre d'une centaine de réalisations simulées du relevé, affectées par un nombre croissant d'incertitudes systématiques. Chaque génération est conçue pour tester l'impact et la maîtrise d'une classe spécifique de ces incertitudes.

À terme, EDRIS devra être capable d'inférer directement les fonctions de sélection à partir des échantillons de supernovæ eux-mêmes, sous des hypothèses mini-

males concernant l'évolution des propriétés des SNe avec le *redshift*. L'objectif est de faire de l'ensemble NaCl+EDRIS un outil d'inférence simple, léger et robuste, ne nécessitant pas les simulations extrêmement coûteuses requises par les approches actuelles. Cette approche est essentielle pour permettre l'analyse d'échantillons cinq à dix fois plus importants que ceux disponibles aujourd'hui, tels que ceux qui seront produits par les relevés de quatrième génération, en particulier Rubin/LSST et Roman.

In fine, le diagramme de Lemaître comprendra entre 8 000 et 10 000 supernovæ proches (correspondant à l'intégralité de l'échantillon spectroscopique ZTF-II), ainsi qu'environ 700 supernovæ distantes. Pour atteindre une mesure du paramètre d'équation d'état de l'énergie noire w à la précision du pour cent — et de ses variations avec le *redshift* à quelques pour cent — et pour assurer une jonction optimale avec le diagramme de Hubble issu des BAO mesurées par DESI, il sera nécessaire d'ajouter au diagramme de Lemaître de l'ordre de 10 000 supernovæ à *redshifts* intermédiaires. Seul le télescope Rubin/LSST, dont les opérations débutent actuellement, est en mesure de fournir un tel échantillon homogène. En parallèle de l'effort en cours consacré à la construction et à l'analyse du diagramme de Lemaître, l'équipe mène une série d'études dédiées à l'optimisation de la stratégie d'observation de Rubin/LSST, afin de constituer cet échantillon dès les premières années du relevé.

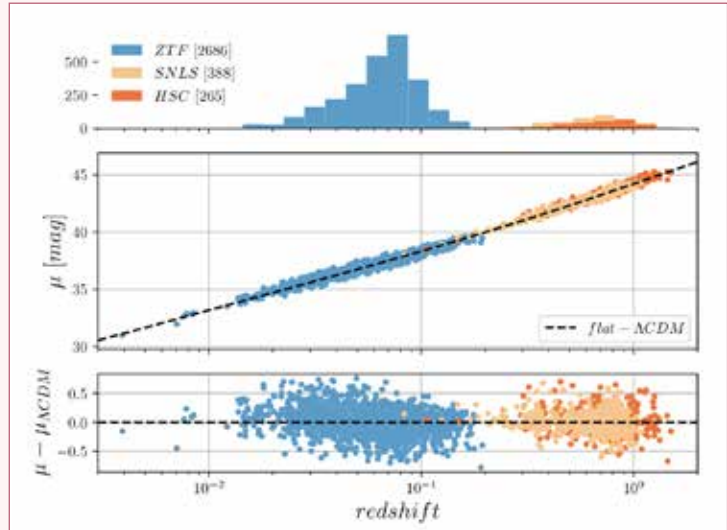
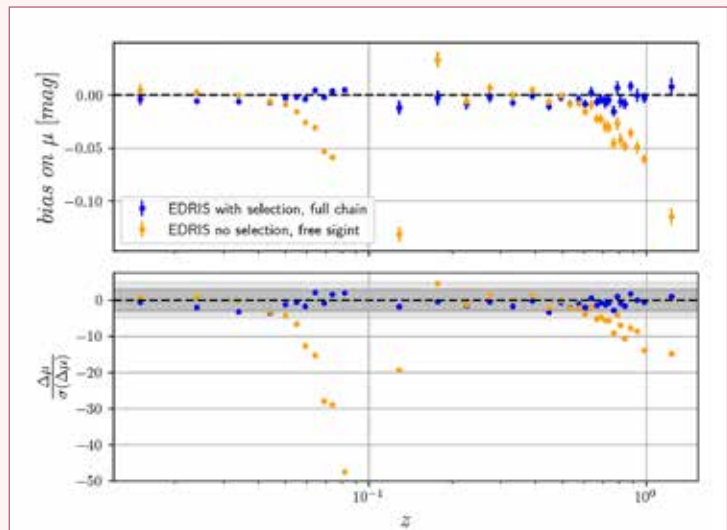


Diagramme de Hubble de l'échantillon Lemaître.



Distances de luminosité corrigées du biais de Malmquist (en bleu) vs. non corrigées (orange).

CHIFFRES CLEFS

400 TB de données brutes.

3 400 supernovæ de type Ia "proches" (1 milliard d'années-lumière).

800 supernovæ de type Ia "lointaines" (10 milliards d'années-lumière).

Chercheuses et chercheurs :

Marc Betoule, Sébastien Bongard, Delphine Hardin, Nicolas Regnault

Équipe technique :

Mathieu Bernard, Jean-Marc Colley

Doctorantes et doctorants :

Dylan Kuhn, Leander Lacroix, Mahmoud Osman

Contraindre la cosmologie avec la cartographie tridimensionnelle des grandes structures de l'univers obtenue par DESI

Introduction

Le projet DESI (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*) 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.

Analyse standard

Analyse BAO - L'analyse BAO de DESI mesure la dilatation de l'Univers en utilisant la signature des Oscillations Acoustiques des Baryons (BAO) dans la distribution spatiale des galaxies comme règle standard pour déterminer précisément les distances cosmiques. Pour cela, on utilise un outil statistique qui quantifie les corrélations spatiales entre les positions de deux galaxies : la fonction de corrélation à deux points (ou son spectre de puissance). La signature des BAO se traduit par un pic à 100 Mpc/h en unités comobiles, correspondant à une distance de séparation entre deux galaxies plus probable. Ces mesures permettent de contraindre le modèle cosmologique, notamment l'expansion accélérée et la nature de l'énergie noire. En mars 2024, la collaboration a publié ses premiers résultats

avec un échantillon de presque 6 millions de *redshifts* de galaxies et quasars collectés pendant la première année d'observation de DESI. Le groupe DESI du LPNHE a participé à la validation des simulations cosmologiques qui ont permis d'étudier les effets systématiques pouvant affecter les mesures. Ces résultats ont été mis à jour en mars 2025 avec un échantillon de plus de 14 millions de *redshifts* correspondant à 3 ans de prise de données. Au total, 30 millions de *redshifts* de galaxies et de quasars ont été collectés pendant 3 ans et ont permis d'obtenir la plus grande carte 3D des structures de l'univers (voir figure 1).

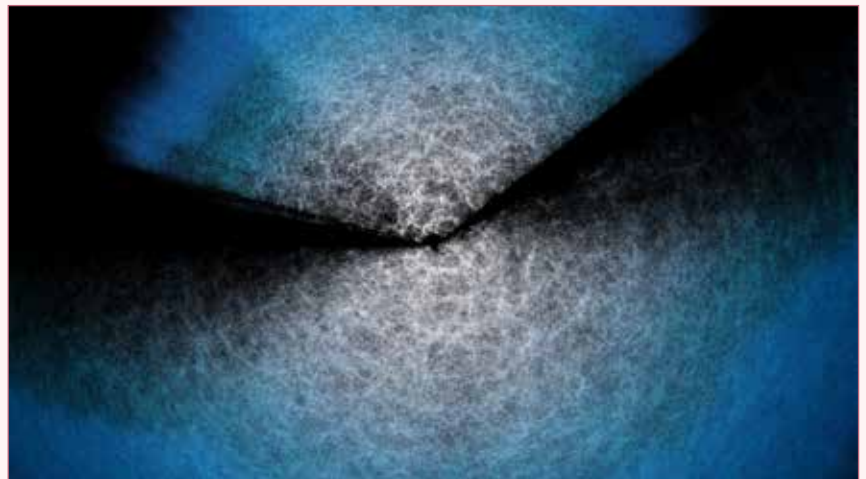


Figure 1 : La plus grande carte 3D de l'univers obtenue à ce jour par DESI pour étudier l'énergie noire. La Terre est au centre, chaque point est une galaxie dont DESI a mesuré la position, plus le point est bleu, plus la galaxie est loin de nous.

Les mesures de distances cosmiques sont représentées sur la figure 1 pour DR2 et DR1 (en ombré) pour chaque échantillon de galaxies, ce qui permet de retracer l'histoire de l'expansion de l'univers sur 11 milliards d'années. La figure 3 page suivante montre les contraintes associées pour les paramètres $w_0 - w_\alpha$ décrivant l'équation d'état d'une énergie noire dynamique avec $w_0 = -1$ et $w_\alpha = 0$ pour la constante cosmologique, lorsque les données DESI sont combinées avec le fond diffus cosmologique (CMB) et avec les supernovæ de type Ia. Nous observons une préférence pour un modèle d'énergie noire dynamique par rap-

port à une constante cosmologique qui varie entre 3σ et 4.2σ , en fonction de l'analyse de supernovæ considérée (voir figures 2 et 3).

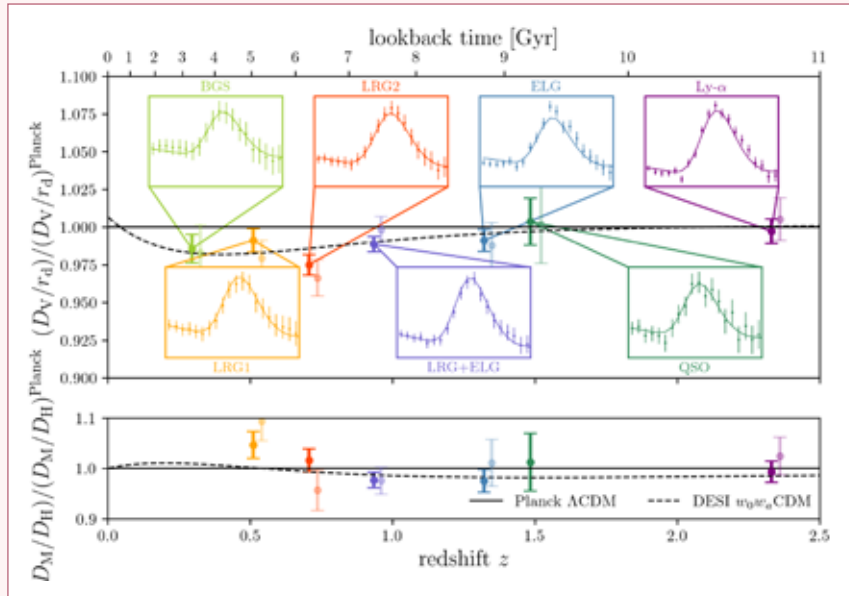


Figure 2 : Mesures BAO des distances cosmiques pour DESI DR2 et DR1 (en ombré) en fonction du redshift pour chaque échantillon de galaxies et normalisées par la prédiction du modèle cosmologique actuel Λ CDM. Le meilleur ajustement avec un modèle d'énergie dynamique w_0, w_α CDM est montré en tiret. Le pic BAO dans la distribution des galaxies.

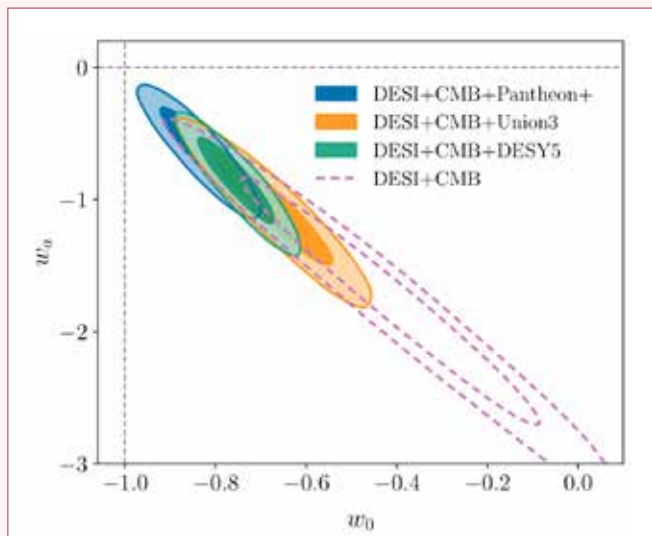


Figure 3 : Contraintes sur les paramètres $w_0 - w_\alpha$ décrivant un modèle d'énergie noire dynamique. Les contours ont été obtenus en combinant les résultats de DESI avec le fond diffus cosmologique (CMB) et les supernovæ de type 1a.

Analyse Full-Shape - Nous avons co-dirigé l'analyse *Full-Shape* du *clustering* des galaxies dans DR1, basée sur la modélisation de la statistique à deux points, et a co-rédigé l'article décrivant la méthodologie, l'étude des systématiques, la combinaison avec les mesures BAO et les implications cosmologiques (DESI collaboration, DESI 2024 V). Cette analyse confirme la validité de la

relativité générale comme théorie de la gravité à grande échelle grâce à la mesure de la croissance des structures. Ce travail s'accompagne de la supervision d'une dizaine d'articles compagnons ainsi que de contributions à l'étude combinant full-shape, BAO et données externes afin de mettre à jour les contraintes sur les modèles cosmologiques (voir figure 4).

Par ailleurs, avec la thèse soutenue dans le groupe en 2024, nous avons développé la chaîne d'analyse pour ajuster la statistique à deux points de l'échantillon BGS complet, là où les analyses officielles se limitent à un échantillon beaucoup plus réduit pour éviter les difficultés techniques associées. Pour cela, nous avons déjà développé une technique alternative pour estimer les barres d'erreur et plus récemment un réseau de neurones pour accélérer la prédiction théorique (Trusov, Zarrouk & Cole 2025). Enfin, nous avons montré que l'analyse de l'échantillon complet permet d'améliorer les contraintes de certains paramètres cosmologiques de

30 % par rapport à l'analyse officielle, et qu'on peut rajouter une amélioration de 15 % en effectuant une analyse multi-traceur qui différencie les galaxies bleues et rouges du DESI BGS pour ensuite les analyser conjointement.

Au-delà des méthodes standard

Le groupe DESI du LPNHE est également impliqué dans le développement de méthodes d'analyse au-delà des méthodes standard qui n'exploitent pas l'information non-Gaussienne et non-linéaire contenue dans les cartes 3D des structures de l'univers obtenues avec DESI. Pour cela, nous poursuivons deux approches complémentaires :

- le développement de nouvelles statistiques au-delà de la statistique à deux points, comme la statistique à trois points ou encore le *density-split* pour lequel nous avons développé un modèle basé sur des simulations. Avec la thèse en cours dans l'équipe, nous menons le développement et la validation de la chaîne d'analyse de ces statistiques alternatives pour le BGS au sein du groupe de travail ACM (*Alternatives Clustering Methods*) de DESI.

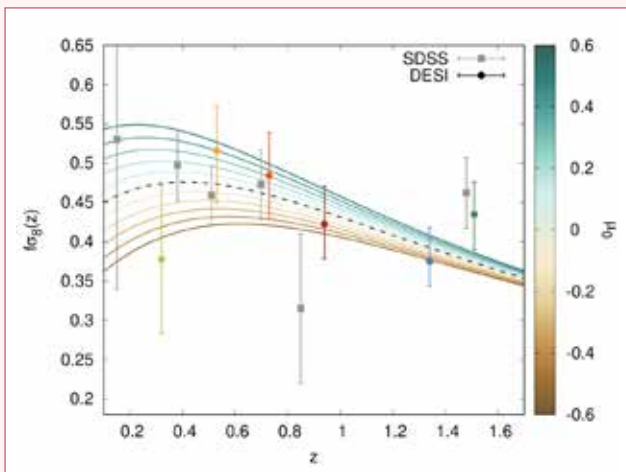


Figure 4 : Mesure de la croissance des structures en fonction du redshift pour DESI et pour le relevé de la génération précédente (gris). La prédiction de la relativité générale est indiquée en tiret noir et les courbes en couleur indiquent des modifications à cette théorie, avec une gravité plus (vert) ou moins (marron) forte que celle prédite par la relativité générale.

- le développement d'une inférence Bayésienne au niveau du champ avec le code BORG (Jasche & Wandelt 2013, Jasche *et al.* 2015, Jasche & Lavaux 2019) et plus particulièrement sa version la plus récente Manticore (McAlpine *et al.* 2025), qui s'affranchit de la compression de l'information en outils statistiques et constitue donc la méthode ultime pour extraire toute l'information contenue dans le champ de densité actuel hautement non-Gaussien. L'idée est de simuler un jumeau numérique des données avec le code BORG (*Bayesian Origin Reconstruction from Galaxies* en i) générant un champ de densité initial Gaussien sur une grille de résolution N (soit N^3 conditions initiales et une cosmologie fixée), puis en ii) modélisant la croissance non-linéaire des structures et en iii) appliquant une relation pour relier le champ de densité de la matière à celui des galaxies observées, ainsi que iv) les fonctions de sélection angulaire et radiale du relevé DESI. Ensuite, on utilise une loi de Poisson pour comparer le comptage de galaxies dans les N^3 voxels du jumeau numérique avec ceux de la carte 3D de DESI afin d'ajuster les conditions initiales, voire certains paramètres cosmologiques. Cette inférence au niveau du champ directement pourrait resserrer les contraintes cosmologiques d'un facteur 2 à 5 par rapport aux méthodes basées sur des observables compressées (REFS), sous réserve d'un contrôle strict des systématiques. Au-delà des paramètres cosmologiques, la méthode fournit des cartes probabilistes détaillées de la distribution de la matière et de son histoire, permettant des tests rigoureux posterior-predictive (comparaison directe modèle-données sans réajustement, validation d'objets individuels comme les amas de galaxies).

Contributions techniques pour la deuxième phase de DESI, DESI-II

Depuis la mise en place du système de calibration de DESI et la calibration en rendement des spectrographes chez Winlight, aucune demande d'évolution instrumentale n'avait été formulée. Cela a changé fin 2024, avec le lancement des discussions sur une mise à niveau du système de calibration. Les lampes utilisées comme références en longueur d'onde restent efficaces, même si des peignes de fréquences seraient intéressants pour de futurs projets. En revanche, l'étape de "flat field" effectuée chaque après-midi nécessite une source à spectre quasi-plat projetée sur l'écran de calibration, empruntant le même trajet optique que les cibles nocturnes. Aujourd'hui, cette opération repose sur la source LED développée au LPNHE, dont les flux ont été ajustés pour obtenir un spectre plat. Cependant, la luminosité est limitée par les LED les moins puissantes, ce qui impose un temps d'exposition élevé (environ 50 minutes). Réduire ce temps améliorerait les opérations et, avec l'arrivée de miroirs collimateurs mobiles, permettrait aussi d'obtenir une calibration de meilleure qualité. La livraison du système LED amélioré est prévue pour l'été 2026. DESI est dans sa première phase d'observation jusqu'à fin 2028. Une deuxième phase du relevé est en cours de préparation et nécessite de nouveaux développements instrumentaux. Bien qu'antérieure à DESI-II, le développement d'un nouveau système de calibration comptera comme nouvelle contribution technique au projet.

Chercheuses et chercheurs :

Christophe Balland, Laurent Le Guillou, Pauline Zarrouk

Équipe technique :

Claire Juramy

Doctorantes et doctorants :

Simon Bouchard, Mahmoud Osman

CHIFFRES CLEFS

Plus de **30** millions de *redshift* collectés par DESI en 3 ans de prise de données.

En **1 an**, DESI a collecté trois fois plus de redshifts qu'en 20 ans de prise de données avec la génération précédente des relevés spectroscopiques.

Cisaillement cosmique

Le groupe développe une activité orientée vers la mesure du cisaillement cosmique, en particulier les aspects instrumentaux et algorithmiques de cette mesure. Cette sonde permet un accès direct à la densité de matière (plus précisément aux fluctuations de celle-ci), qu'il s'agisse de matière noire ou non. L'évolution des contrastes de densité avec le redshift est sensible à la fois aux distances cosmologiques, et à la dynamique de la formation des structures. Cette double sensibilité permet à cette sonde de contraindre l'énergie noire et de tester la relativité générale aux grandes échelles. Cette sonde consiste en pratique à mesurer les corrélations angulaires des ellipticités des galaxies, qui peut être prédite précisément. Cette mesure fait face à des difficultés redoutables, en particulier face à la statistique que va collecter Rubin. Au moins trois difficultés sérieuses méritent attention : il faut mesurer des ellipticités à bas signal sur bruit, en éliminer les effets dus à l'optique (i.e. mesurer la forme des étoiles), et inférer le *redshift* des galaxies à partir de leur photométrie multibande.

La thèse soutenue dans le groupe en 2024 a porté sur le développement d'un estimateur non biaisé du

cisaillement sur les images de galaxies. Nous travaillons également à la réduction d'un biais associé à la mesure de la forme des galaxies : la mesure de la PSF (la réponse du télescope à une source ponctuelle). La mesure de la PSF consiste à modéliser la distribution de lumière des étoiles, mais celles-ci sont affectées par les distorsions électrostatiques dans le CCD. Nous développons depuis une décennie la mesure et la correction de ces distorsions et avons finalisé et testé la méthode sur des images de la caméra HSC du télescope Subaru, publiée en 2023. Cette méthode est en cours d'implémentation dans les codes pour Rubin (collaboration avec Princeton), et les résultats de validation seront rapidement publiés. Nous avons aussi développé les méthodes de caractérisation fine des distorsions électrostatiques qui affectent les senseurs de Rubin, et en particulier de leur dépendance chromatique, et ces études font l'objet d'une thèse en cours dans le groupe.

Chercheuses et chercheurs :

Pierre Astier

Doctorantes et doctorants :

Enya van den Abele, Yassine Faris



Groupe NGC 4410, membre de l'amas de la vierge : image cumulant des poses reflétant la profondeur du relevé SDSS magnitude limite 22, soit 2,5 fois plus faible que le ciel.

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 de 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 (par exemple 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 gravité. 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.

Chercheuses et chercheurs :

Michael Joyce

CHIFFRES CLEFS

61 443 : nombre de particules dans la plus grande simulation d'un modèle dit "scale-free" utilisée pour déterminer la précision des simulations cosmologiques



Soutien à la recherche

SERVICES TECHNIQUE

■ Service électronique et instrumentation

- Expertises du service
- Pôle CAO-câblage

■ Service informatique

- Infrastructure serveurs et réseaux
- Développement au sein des expériences

■ Service mécanique

- Bureau d'études
- Réalisation, contrôles et tests
- Ouverture et diffusion

PLATEAUX TECHNIQUE ET PLATEFORMES

■ Plateformes

■ Plateforme de Calcul et de stockage

■ Plateforme CLAP de fabrication et caractérisation des détecteurs à semi-conducteurs

- Salles propres
- Plateau technique de Wirebonding

- Machine de test sous pointes
- Plateforme de fabrication et caractérisation des détecteurs à semi-conducteurs

■ Groupe de prospectives sur l'embarqué au LPNHE

■ Activité transverse intelligence artificielle

■ FabLab

SUPPORT À LA RECHERCHE

■ Services de l'administration

- Ressources humaines du LPNHE
- Ressources financières du LPNHE

■ Communication et documentation

- Événements marquants et innovations en médiation scientifique
- Informations internes
- Documentation

■ Services généraux

- Pôle logistique et maintenance
- Travaux et réaménagements

■ Hygiène et sécurité



Soutien à la recherche

L'intense activité de recherche du laboratoire mobilise une large gamme de compétences techniques et administratives. Au LPNHE, il s'agit d'une quarantaine d'IT mobilisés, principalement CNRS. Ces activités sont structurées en quatre services techniques (électronique et instrumentation, informatique, mécanique et services généraux) auxquels se joint l'administration. Chaque service gère un ensemble d'activités cohérentes autour d'un ou plusieurs métiers, avec les infrastructures (ateliers, salles blanches, salles serveurs, etc.) et l'équipement associé. Des réunions régulières de service permettent de mettre en commun les expériences, d'assurer une excellente qualité technique, de développer les réseaux métier, et en général de faire progresser le collectif et les personnes.

Comme nous allons l'expliquer plus loin, certains équipements font partie de deux plateformes du laboratoire. Cela permet de proposer aux autres laboratoires du site, mais aussi de la région et de l'IN2P3, de bénéficier d'un accès à des services et à des compétences précieuses.

On ne peut pas évoquer le soutien à la recherche sans remercier Sorbonne Université qui nous fournit un appui inestimable par les locaux qu'elle met à disposition ainsi que par l'aide pour les entretenir et les maintenir opérationnels.



Service électronique et instrumentation

Le service Électronique et Instrumentation du LPNHE comprend dix-huit personnels permanents dont 1 technicien, 2 assistants ingénieurs (AI), 4 ingénieurs d'études (IE), et 9 ingénieur.es de recherche (IR), ainsi que deux contrats CDD assistants ingénieurs. Le service est impliqué dans presque tous les développements instrumentaux du laboratoire, qu'il s'agisse des projets de physique auprès des grands accélérateurs, de matière noire, d'astroparticules ou de cosmologie observationnelle. Certain.es ingénieur.es ont des responsabilités de chef de projet dans des composantes nationales ou internationales de grandes expériences. Un pôle CAO-câblage offre toute l'assistance nécessaire pour la réalisation de cartes d'électronique.

Expertises du service

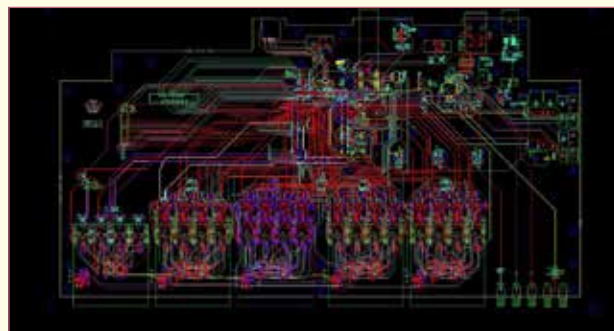
Les électroniciennes et électroniciens du laboratoire assurent la conception, la réalisation, le test et le suivi de systèmes destinés à fonctionner sur les sites d'expériences dans des conditions environnementales très variées (rayonnements ionisants intenses, cryogénie). Pour ces raisons, les différentes 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, contrôle-commande. Le service dispose notamment d'une expertise solide en électronique numérique, en particulier dans la mise en œuvre de circuits numériques programmables (FPGA). Les membres du service veillent à maintenir leurs compétences à la pointe, d'une part au sein des groupes de travail transverses du LPNHE consacrés aux thèmes des OS embarqués et du transfert de temps, mais aussi en développant des collaborations avec les collègues d'autres laboratoires.

Les compétences des ingénieurs du service recouvrent aussi des technologies variées de détection. Des bancs de test expérimentaux sont assemblés dans les locaux du laboratoire, pour caractériser les détecteurs des projets en développement.

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. Les circuits imprimés (PCB) ainsi conçus incluent 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. 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 tous types de composants grâce à l'équipement de l'atelier.



Réalisation du pôle CAO-câblage : routage de la carte de distribution d'horloge pour Hyper-Kamiokande.

Équipe technique :

Xavier Aubert, Nikita Bogatyrev, Julien Coridian, Pascal Corona, Francesco Crescioli, Gabriel Degret, Marc Dhellot, Fabien Frérot, Romain Gaïor, Cyrille Goulet, Claire Juramy-Gilles, David Martin, Jean-Luc Meunier, Éric Pierre, Jean-Pascal Rivierre, Stefano Russo, François Toussenet, Alain Vallereau

Étudiantes et étudiants :

Iman Choubai, Lounès Iddir

CHIFFRES CLEFS

4 recrutements en mobilité

17 cartes conçues

17 projets ont fait appel aux membres du service

Service informatique

Le service informatique est composé de 12 personnes au 1^{er} décembre 2025 : 8 IR, 3 IE et un AI. Le service assure les tâches suivantes 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 virtualisées et conteneurisées. 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.

Infrastructure serveurs et réseaux

Le service informatique administre 37 serveurs physiques dont 3 sont dédiés à la virtualisation de 55 serveurs. L'ensemble du parc est géré avec l'outil d'administration et de déploiement centralisé *Ansible* qui permet un déploiement multinœuds 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 sont transférés automatiquement sur un autre hyperviseur ce qui permet d'assurer une haute disponibilité des services. En plus des serveurs, le service gère également plus de 200 postes de travail et 150 ordinateurs portables dont les disques sont chiffrés selon les recommandations du CNRS. 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

Équipe technique :

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



Le service informatique dans la salle des serveurs.

données utilisateurs (*snapshots*) organisés comme suit : 2 *snap*s par jour conservés pendant 2 jours, 1 par nuit conservé pendant 15 jours, 1 par semaine conservé pendant 10 semaines et un par mois conservé pendant 10 mois. L'intégralité est aussi sauvegardée au Centre de Calcul de Lyon quotidiennement. Le système de stockage volumétrique 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. Le système est réparti sur 2 salles, une au sous-sol et une au 2^e étage. Chaque donnée possède 3 copies sur 3 serveurs différents dont au moins une copie dans chacune des deux salles. Il se compose de 9 serveurs de stockage pour un total brut de 2,3 Po (176 disques). Le tout est interconnecté en fibre 10 et 25 Gbps. Le cœur du réseau est actuellement basé sur des liens à 2x 100 Gbps pour les liens principaux et 2x10 Gbps pour les liens secondaires. Différents sous-réseaux permettent de sécuriser les activités les plus sensibles et d'augmenter la qualité de service. Le service fait régulièrement évoluer ses systèmes d'information, et vient de mettre en production un nouveau VPN basé sur *OPNsense* et travaille la mise en place de *Jamf* pour la gestion centralisée de son parc de Macs Apple.

Développement au sein des expériences

Huit membres du service informatique sont impliqués activement dans le développement au sein des expériences du laboratoire. Leurs travaux portent entre autres sur le développement d'applications en temps réel, le contrôle-commande, les interfaces homme-machine, la simulation, l'analyse et le traitement de données, les bases de données et les modèles d'intelligence artificielle. Ils interviennent dans les projets LSST, T2K, CTA, GRAND, Stardice, LHcb, HK, HGTD, ITK et ZTF. Leurs contributions sont présentées au sein des chapitres dédiés à ces expériences.

Service mécanique

En 2025, le service est une équipe de 2 IR, 2 IE dont 1 CDD, 5 AI dont 1 CDD et 1 apprenti.

Grâce à l'expertise de ses membres, le service mécanique étudie, réalise, met au point et intègre des sous-ensembles de détecteurs en physique des particules, implantés auprès des grands accélérateurs, ou pour des expériences en astroparticules et en cosmologie. Ces développements et réalisations sont menés, là aussi, dans le cadre de collaborations internationales.

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. Des membres du service ont d'ailleurs la responsabilité technique au laboratoire des projets LSST et HGTD. Il intervient aussi dans la mise en place de nouveaux projets au laboratoire et dans la production de détecteurs pour l'expérience ATLAS (ITk et HGTD).

Les compétences du service couvrent non seulement la mécanique (conception, dimensionnement, fabrication, contrôle) mais aussi les domaines connexes tels que la mécatronique, le vide, la thermique, la cryogénie et l'optique.

Bureau d'études

Le bureau d'études est équipé de logiciels de CAO (3DEXPERIENCE CATIA) et de calcul aux éléments finis performants (ANSYS) et utilise les systèmes de gestions de données techniques (3DEXPERIENCE ENOVIA et ATRIUM). Un responsable du bureau d'études a été nommé au premier septembre 2025.

Réalisation, contrôles et tests

L'atelier, dont le nouveau responsable est arrivé au premier mai 2025, 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 et MasterCAM). Le service dispose d'une salle de métrologie équipée entre autre d'une colonne de mesure et d'une machine de mesure tridimensionnelle (Metrolog X4), pour le contrôle des pièces. L'imprimante 3D multi-matériaux (PLA, ABS, PC, PC-CF, PEI, PEEK, ...)

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 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.



Formation Metrolog X4.

Ouverture et diffusion

Le service est actif dans les 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, CRDPS, jury de concours, réseaux métiers) et plus largement dans des actions de présentation du service au grand public.

Équipe technique :

Sébastien Colinot, Guillaume Daubard, Charlotte Georget, Evan Hily, Alexandre Lantheaume, Didier Laporte, Yann Orain, Bruno Ricci, Adama Sylla

Étudiantes et étudiants :

Jean-Charles Monroe

CHIFFRES CLEFS

18 clamps inspectés pour LSST

48 supports units conçus pour HGTD

Plateformes

Dans la mandature précédente, le laboratoire s'est doté de deux plateformes techniques. La Plateforme de Calcul et Stockage (PCS) comprend l'équipement informatique des deux salles serveurs. Elle abrite les serveurs d'autres laboratoires dans un environnement contrôlé et avec le soutien de l'équipe informatique. La plateforme Capteurs à la Pointe (CLAP) a été créée autour de la nouvelle machine de test sous pointes qui a été achetée grâce à l'aide de la région Île-de-France (programme SESAME). Elle regroupe aussi d'autres équipements très performants (micro-câblage et équipement associés, outils de métrologie, de caractérisation et test, scan rayon X, etc.) utilisés entre autre pour l'assemblage du détecteur silicium ITk pour ATLAS.

Ces plateformes permettent l'accès à ces équipements aux équipes d'autres laboratoires du site et de l'IN2P3 ainsi que de bénéficier des compétences du LPNHE. L'intérêt pour SU, pour UPCité et pour le CNRS est démontré par le soutien qu'ils nous ont accordé, notamment par le biais d'appels à projet spécifiques. La rénovation de la centrale de traitement d'air des salles blanches ainsi qu'un nouveau plafond soufflant offre à la plateforme CLAP un en-

vironnement ISO6-ISO7 bien contrôlé et stable, un atout majeur pour les développements futurs.

En 2025, nous avons démarré un FabLab, qui comprend deux imprimantes 3D (une à filament, une à résine), et une découpeuse laser. Depuis, l'intérêt des chercheurs et des ingénieurs pour cet équipement est allé en croissant. Les projets bénéficient d'un moyen accessible pour réaliser des prototypes et de les perfectionner avant une éventuelle fabrication métal. De nombreux stagiaires et étudiants peuvent apprendre ces techniques qui complètent un apprentissage théorique ou un stage d'observation.

Deux R&D transverses ont été lancées. La première développe des outils d'Intelligence Artificielle au service des analyses de physique ou des problèmes de calcul en temps réel, s'appuyant entre autre sur l'expérience acquise grâce au projet de déclenchement en temps réel RTA pour LHCb. La deuxième, la R&D IA embarqué, vise à implémenter certaines de ces solutions sur l'électronique frontale, par exemple sur FPGA. Les deux initiatives avancent aussi par des réunions régulières d'échange entre collègues de services ou équipes différentes.

Plateforme de Calcul et de stockage

La Plateforme de Calcul et de Stockage du LPNHE (PCS-LPNHE) est labélisée depuis janvier 2023 par Sorbonne Université et est installée dans les salles serveurs du laboratoire. Elle offre les services suivants :

- Un centre de calcul et de stockage basé sur les technologies de grille de calcul. Celui-ci sert les expériences auprès du LHC au CERN, dans le cadre du projet WLCG (« World LHC Computing Grid ») et les besoins d'autres expériences dans le cadre des projets EGI (« European Grid Infrastructure ») et France Grilles. Cette activité existe depuis 2005 dans le cadre du projet GRIF (« Grille au Service de la Recherche en Île-de-France »).
- Un site de *cloud computing* basé sur les technologies type *Openstack*.

- L'hébergement de matériels informatiques provenant d'autres laboratoires et projets de Sorbonne Université. Cette activité est apparue au LPNHE à partir de 2013.

Le projet GRIF est un projet commun aux laboratoires de physique des hautes énergies d'Île-de-France. Il s'agit d'un centre de calcul de type Tier-2 pour le LHC réparti sur plusieurs sites et géré par une équipe d'une dizaine de personnes, dont deux au LPNHE, appartenant aux différents laboratoires participants. Les ressources de calcul à disposition au LPNHE sont de 141 nœuds de calcul permettant de traiter plus de 5500 tâches simultanément. Le stockage utile total est de plus de 6 Po, réparti sur près de 800 disques sur 30 serveurs et utilise le système de stockage EOS

●●● Plateforme de Calcul et de stockage

développé par le CERN. Un total de 14 serveurs est utilisé pour différents services. Le réseau s'effectue à 20 Gbit/s entre les membres de GRIF, vers le CC-IN2P3 et les autres centres, à travers RENATER et le réseau dédié LHCONe. Les principaux utilisateurs ont été ATLAS, LHCb et CTA ainsi que AUGER et l'Institut des Systèmes Complexes - Paris Île-de-France (ISC-PIF).



L'une des salles serveurs hébergeant la plateforme PCS-LPNHE.

Le site de *cloud* est basé sur Openstack. Le *cloud* permet aux utilisateurs de déployer des machines virtuelles (VM) avec le système d'exploitation de leur choix, une adresse IP publique, un nombre de cœurs de calcul et une quantité de RAM variant suivant les spécifications. Il consiste en 5 serveurs de 64 cœurs et 384 Go de mémoire vive (RAM), totalisant près de 440 cœurs logiques et quelques To de stockage sur le *backend* Ceph du laboratoire. Un serveur Jupyterhub est à disposition depuis 2024 utilisant un *cluster* Docker Swarm composé de trois VMs, chacune ayant 24 cœurs et 92 GB de RAM.

La plateforme exploite 4 des 22 baies de serveurs disponibles pour l'hébergement de ressources d'autres laboratoires de Sorbonne Université, comme le LCQB (Laboratory of Computational and Quantitative Biology), le LPTHE (Laboratoire de Physique Théorique et

de Hautes Énergies) et l'INSP (Institut des NanoSciences de Paris), ainsi qu'une autre plateforme de bio-informatique ARTBio.

Deux ingénieurs du service informatique assurent l'administration et l'exploitation de la plateforme. Ils contribuent au déploiement de l'intergiciel, au développement de l'outil *Quattor* dans l'ensemble du projet GRIF, qui permet de définir et maintenir une configuration générique des services de la grille et au développement d'outils de suivi des sites. L'opération des ressources des sites français est coordonnée par la direction de LCG-France et de France-Grilles-Cloud. L'un des ingénieurs a assuré la formation d'un apprenti en Master 2 en Ingénierie des Réseaux et des Systèmes. Celui-ci est désormais en CDD et remplace depuis l'automne 2024 ce même ingénieur. Ils offrent aussi une aide ponctuelle aux laboratoires hébergés pour leurs achats, l'installation et la maintenance de leurs serveurs.

Le projet continuera dans les années à venir, et se prépare en particulier pour la phase de haute luminosité du LHC.

Chercheur :

Frédéric Derue

Équipe technique :

Aurélien Bailly-Reyre, Amar Hami, Victor Mendoza

CHIFFRES CLEFS

188 serveurs physiques

5 serveurs de virtualisation

6300 To utiles de données

3 millions de jours de calcul

Plateforme CLAP de fabrication et caractérisation des détecteurs à semi-conducteurs

Salles propres

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'ISO7 à l'ISO6. De plus, deux plafonds soufflants sont installés dans la salle de classe ISO 6 afin de fournir des espaces classés ISO 5. Elles occupent une surface totale de 95 m². Des travaux majeurs ont été réalisés en 2025 pour renouveler la Centrale de Traitement d'Air (CTA) qui forme le cœur d'une salle propre en filtrant l'air et en régulant la température, l'hygrométrie et la pression de chaque salle. Les salles bénéficient depuis les locaux techniques d'un approvisionnement centralisé en air comprimé filtré, air comprimé médical, 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 les dispositifs nécessitant un vide primaire. Ces salles sont complétées par un plafond soufflant d'environ 100 m² de classe ISO8 pour les objets volumineux avec un pont roulant 5T. Quatre autres pièces sont aussi équipées de plafonds soufflant de classe ISO7 pour des surfaces comprises entre 10 et 30 m².

Plateau technique de Wirebonding

Le plateau technique se compose d'une machine de *wirebonding* de la marque F&S Bondtec modèle 5830. Deux têtes sont disponibles pour réaliser du *wedge bonding* avec un fil aluminium de 25 µm et du *ball bonding* avec un fil or de 25 µm. Un outil *deep access* permet l'accès à des zones contraintes spatialement. Pour des travaux de R&D, elle est utilisée en mode manuel et en production, elle fonctionne de manière automatique (avec positionnement du composant par un opérateur), sous le contrôle du *wirebonder*. Elle est complétée par une machine de *pull test* permettant d'évaluer la tenue et la fiabilité des fils bondés en

déterminant la force nécessaire pour la rupture du fil. Le test destructif, dans lequel il y a cassure du fil, est majoritairement utilisé. La force, l'endroit de casse et le type de défaut sont mesurés. Le test non destructif est réalisable avec cette machine. L'ensemble a été financé par la région Ile-de-France, l'IN2P3 et le LPNHE et mis en service en 2019. Actuellement, la principale utilisation de la plateforme de *wirebonding* concerne ATLAS ITk (voir photo 1). En fonction des possibilités offertes par le calendrier de production, elle est employée pour d'autres projets. Par exemple, nous intervenons dans le cadre du projet Qubic coordonné par l'APC afin d'améliorer le design du PCB. Cela démontre sa polyvalence et sa valeur ajoutée au LPNHE.

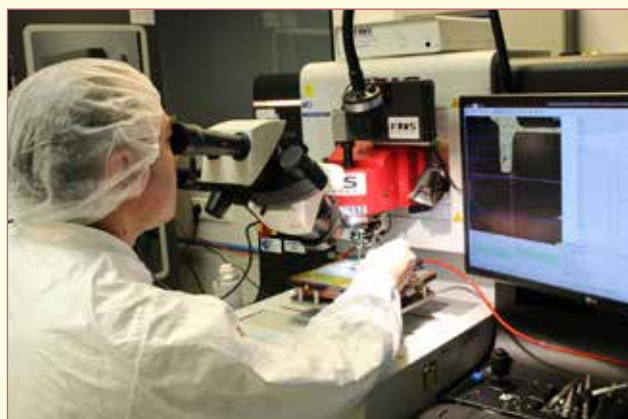


Photo 1 : machine de Wirebonding F&S Bondtec 58 series.

Machine de test sous pointes

La plateforme CLAP se compose d'une machine de test sous pointes TESLA200 et de l'instrumentation associée. Elle permet de mesurer les caractéristiques courant-tension et capacitance-tension pour des détecteurs à semi-conducteur, des micro-circuits et des circuits imprimés, et cela, à très bas bruit. L'enceinte contenant le plateau est un point fort de cette machine, car elle permet de travailler dans une plage de température importante de -55 °C à +300 °C et à des hautes tensions pouvant s'élever à 3 kV sans problème de condensation grâce à l'injection d'air médical. De plus

...

●●● Plateforme CLAP de fabrication et caractérisation des détecteurs à semi-conducteurs

cette enceinte permet de réaliser des mesures dans le noir ce qui est capital pour les composants sensibles à la lumière. Le bruit résiduel du plateau sous tension est de 20 fA. Le diamètre des pointes utilisées est de 2,4 µm et la résolution de positionnement des pointes est inférieure au µm. Les courants typiques mesurés sont de l'ordre du pA et les capacitances sont de l'ordre du fF. Jusqu'à six sondes (et le plateau) sont utilisables simultanément pour réaliser les tests. Cette machine est conçue pour réaliser des tâches de manière automatique. Par exemple le positionnement du plateau après chargement des composants est automatique, de même le déplacement est automatique pour le plateau et la caméra afin de réaliser la même mesure sur plusieurs composants (mesure en série). L'ensemble a été financé par la région Île-de-France, Sorbonne Université et le CNRS, et mis en service en 2023.



Photo 2 : Testeur sous pointes FormFactor TESLA200.

Plateforme de fabrication et caractérisation des détecteurs à semi-conducteurs

Pour mettre d'une part en œuvre l'expérience du LPNHE dans la fabrication et le test de détecteurs et d'autre part de proposer une offre cohérente à des projets internes et externes, le plateau technique et la plateforme ont été rassemblés en une seule plateforme en 2025. La principale application depuis 2023 et jusqu'en 2026 est la production des modules pour ATLAS ITk. Ces modules sont destinés à la mise à jour d'ATLAS pour la phase haute luminosité du LHC. La France est engagée dans ce projet ambitieux et elle a confié la construction de 2000 modules aux laboratoires de l'IN2P3 LPNHE et IJCLab et du CEA IRFU. La contribution française intervient pour 30 %

du total ce qui en fait le plus important contributeur. Pour ATLAS ITk, la caractéristique courant-tension de chaque détecteur silicium est réalisée grâce à la machine de tests sous pointes. Après collage du détecteur silicium et de son électronique flexible, les deux sont reliés électriquement grâce à la machine de *wirebonding* et les fils testés à l'aide de la machine de *pull test*. Ces installations sont utilisées dans le cadre des projets de R&D sur les semi-conducteurs du laboratoire. L'équipe dédiée à la réalisation de ces opérations est actuellement composée de trois IT du service électronique dont un prendra sa retraite au deuxième semestre 2025. Pour faire face à la phase intensive de production des modules ITk, l'équipe a été renforcée par l'intégration de deux IT en CDD qui ont débuté en avril et octobre 2024. La gestion de la plateforme est répartie entre 3 personnes : la gestion technique, la gestion de la CTA et la gestion scientifique.



Photo 3 : Chargement d'un module nu ITk sur plateau du testeur sous pointes.

Équipe technique :

Xavier Aubert, Cyrille Goulet

CHIFFRES CLEFS

95 m² de salles propres

1 testeur sous pointe semi-automatique

1 machine de *wirebonding* semi-automatique

Groupe de prospectives sur l'embarqué au LPNHE



Carte Digilent genesys2 testée par le groupe embarqué.

Le groupe embarqué du LPNHE fédère électroniciens et informaticiens pour mutualiser les compétences autour des systèmes embarqués et accompagner les projets du laboratoire et de l'IN2P3. Créé à la suite des prospectives techniques de 2022, il vise à renforcer les synergies, capitaliser les expertises, accélérer l'innovation et anticiper les besoins futurs des expériences de physique.

Les activités principales incluent :

- Réunions mensuelles pour suivre les développements en cours, identifier les besoins et favoriser de nouvelles initiatives.
- Activités d'accompagnement des stagiaires du groupe et formations des apprentis.
- Participation à des formations et conférences : ANF DAQ intelligent (Roscoff 2024), ANF Deep Robot (Clermont-Ferrand 2025), formation RISC-V (Orsay 2025), Think Xilinx IA embarquée (octobre 2025).
- Une base documentaire partagée a été mise en place sur la *forge* IN2P3 et *GitLab* pour centraliser le savoir-faire et assurer la continuité des développements.

Le groupe dispose d'un parc complet : FPGA (Kintex-7, Zynq, Arria 10, DE0), SoC RISC-V, plateformes IA (Jetson Orin), PC de développement. Les axes technologiques majeurs sont :

- RISC-V, architecture de processeur libre et extensible,
- OpenAMP, pour la communication entre processeurs hétérogènes,
- IA embarquée, pour le traitement local, la compression et les agents autonomes.

Un projet à venir structure déjà une bonne partie de la feuille de route du groupe : ANR OSCAR. Intégration de coprocesseurs IA et RISC-V dans une architecture multicœur. L'objectif est un démonstrateur ASIC complet à huit cœurs RISC-V pour le débruitage et la déconvolution à la source. Et un autre projet se profile également : PRIDE. Développement d'un eFPGA open-source tolérant aux radiations, compatible RISC-V, pour permettre la reprogrammation et l'intelligence embarquée dans les ASICs de détecteurs.

Le groupe embarqué fait de la formation par la pratique un axe fort de ses activités. Les stagiaires sont intégrés à des projets concrets mêlant électronique, logiciel et intelligence embarquée, leur permettant de contribuer activement tout en se formant aux méthodes et outils du laboratoire.

En 2024 et 2025, le groupe a accueilli deux stagiaires sur l'implémentation triple processeur RISC-V sur FPGA Genesys 2, avec systèmes d'exploitation embarqués hétérogènes et sur la carte Arria 10, avec compilation d'un Linux embarqué, configuration de la logique programmable et programmation *bare-metal* du processeur Nios II. Le groupe a également initié un partenariat avec Polytech Sorbonne pour l'accueil régulier d'apprentis ingénieurs, favorisant une continuité des développements et un transfert progressif des compétences. La première apprentie, Iman Choubai, a rejoint le groupe en octobre 2025.

Le groupe embarqué du LPNHE s'impose comme un pôle structurant et innovant, fédérant les expertises



●●● Groupe de prospectives sur l'embarqué au LPNHE

en électronique et informatique embarquée. Les projets OSCAR et PRIDE positionnent le laboratoire au cœur des développements IA et microélectronique pour la physique des particules.

Équipe technique :

David Martin, Jean-Luc Meunier, Francesco Crescioli, Diego Terront, Jean-Marc Colley, Vincent Voisin, Eduardo Sepulveda, Stefano Russo, Marc Dhellot, Alain Vallereau, Gabriel Degret

Étudiantes et étudiants :

Iman Choubai, Fotis Giasemis

CHIFFRES CLEFS

8 ingénieur.es au moins participent régulièrement aux réunions du groupe
148 heures de formation suivies par les agents
2 stagiaires accueilli.es et
1 apprentie recrutée
1 collaboration inter-laboratoires IN2P3 en cours pour le projet OSCAR
1 perspective de collaboration européenne autour des eFPGA

Activité transverse intelligence artificielle

L'activité IA au LPNHE est principalement motivée par un besoin de précision : avec l'augmentation massive du volume de données provenant d'expériences comme celles du CERN ou des observatoires cosmologiques, les méthodes statistiques classiques atteignent leurs limites. Plusieurs axes de l'IA sont explorés au LPNHE :

- Là où les méthodes statistiques classiques sont limitées par la taille des données, l'IA est un excellent outil pour classer les événements issus des collisionneurs ou pour identifier des événements rares. Les équipes du laboratoire développent ainsi leurs propres algorithmes IA avec des structures de réseaux de neurones et d'apprentissage spécifiques pour le traitement des données dédiés à leur analyse. L'utilisation de l'IA générative est aussi explorée. Plusieurs thèses autour de cet axe ont été encadrées.
- L'équipe ATLAS du LPNHE a développé des méthodes de machine learning (ML) pour la simulation et l'analyse des données. Des architectures de transformeurs et le simulateur `Lorenzetti` (`Geant4`) améliorent la génération d'événements et la modélisation des calorimètres, tandis que des techniques de super-résolution optimisent la résolution du calorimètre électromagnétique. En analyse,

le ML renforce l'identification des résonances, l'étalement des jets via `LundNet`, et réduit les effets de diaphonie.

Pour les aspects de problèmes inverses (*unfolding*), des méthodes génératives ont été développées pour traiter des observables de grande dimension, en intégrant des corrections d'acceptance et d'efficacité. Ces approches permettent une évaluation robuste des incertitudes et ont fait l'objet de comparaisons systématiques avec des méthodes traditionnelles, notamment pour des études de sous-structure des jets. Ces avancées exploitent les infrastructures locales, comme le *cluster* GPU, et renforcent les collaborations interdisciplinaires au LPNHE.

- L'équipe LHCb explore les algorithmes IA du Type GNN (Graph Neural Networks) pour le traitement en temps réel des données. Ainsi, outre le développement des *pipelines* d'apprentissage, l'équipe a aussi réussi l'inférence IA en mode compilé pour une exécution en temps réel. Cette approche pionnière a été menée autour de deux thèses encadrées au laboratoire avec des résultats prometteur pour l'intégration dans le *trigger* RTA / Allen de l'expérience LHCb. Ce travail permet aussi d'envisager l'IA embarquée dans d'autres domaines de recherche et d'application.

- Les équipes d'ingénieurs du LPNHE mènent aussi une approche IA orientée vers le hardware avec un objectif d'inférence sur les puces FPGA ou RISC-V dédiées, permettant d'optimiser la consommation énergétique et la possibilité de l'usage dans le domaine de l'embarqué et de la robotique.
- Enfin, le LPNHE s'est équipé d'un *cluster* dédié à l'IA des cartes GPUs de dernière génération. Grâce à cette acquisition, de nouveaux axes de développement sont en cours, notamment avec les laboratoires de l'UFR de physique, favorisant ainsi l'interdisciplinarité et les échanges thématiques entre les physicien.nes de l'UFR. À citer parmi les axes, échanges et projets en cours :
 - Ré-entraînement de LLM adaptés aux problématiques de recherche et de la physique.
 - En lien avec l'enseignement : faire le lien avec le Cloud Enseignement et le Cloud Recherche du

LPNHE, en permettant aux étudiant.es accueilli.es au laboratoire d'utiliser JupyterHub avec les ressources GPU. Cela permettra l'appréhension de la technologie GPU et IA pour l'enseignement et les stages.

- IA générative pour la physique des hautes énergies.
- Possibilité d'utilisation de la technologie GPU pour les simulations quantiques.
- Possibilité de dimensionner les algorithmes IA sur le cluster local avant les demandes sur les Calculateurs Nationaux pour optimiser les demandes.

Dans beaucoup de cas, la demande d'accès à nos étudiants accueillis en stage prend du temps à être validée.

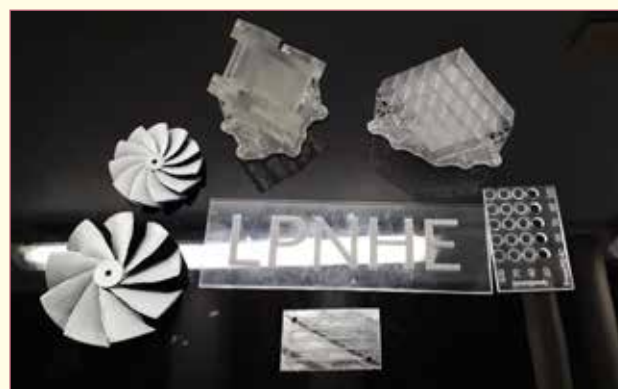
FabLab

En 2025, le LPNHE s'est équipé d'un FabLab permettant d'accélérer le processus de prototypage pour les nouvelles R&D du laboratoire. Il est composé d'une imprimante 3D multi-filaments, d'une imprimante 3D résine et d'une découpeuse laser. La salle dédiée est équipée de tous les équipements de sécurité nécessaires à cette activité.



Machines du FabLab nouvellement aménagé, en premier plan découpeuse laser et son système de filtration, en arrière-plan l'imprimante 3D à filaments.

De nouvelles expériences telles que NuCube ou le drone StarDice, dont les concepts sont à un stade très précoce, ont ainsi pu bénéficier des machines du FabLab pour faire des tests et ainsi orienter les choix expérimentaux.



Exemple de réalisations au Fablab.

Outre l'apport en prototypage, le FabLab est un excellent outil pédagogique et de diffusion scientifique, il a permis d'enrichir les stages des étudiantes et étudiants accueillis au LPNHE en facilitant la démarche expérimentale.

Services de l'administration

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.

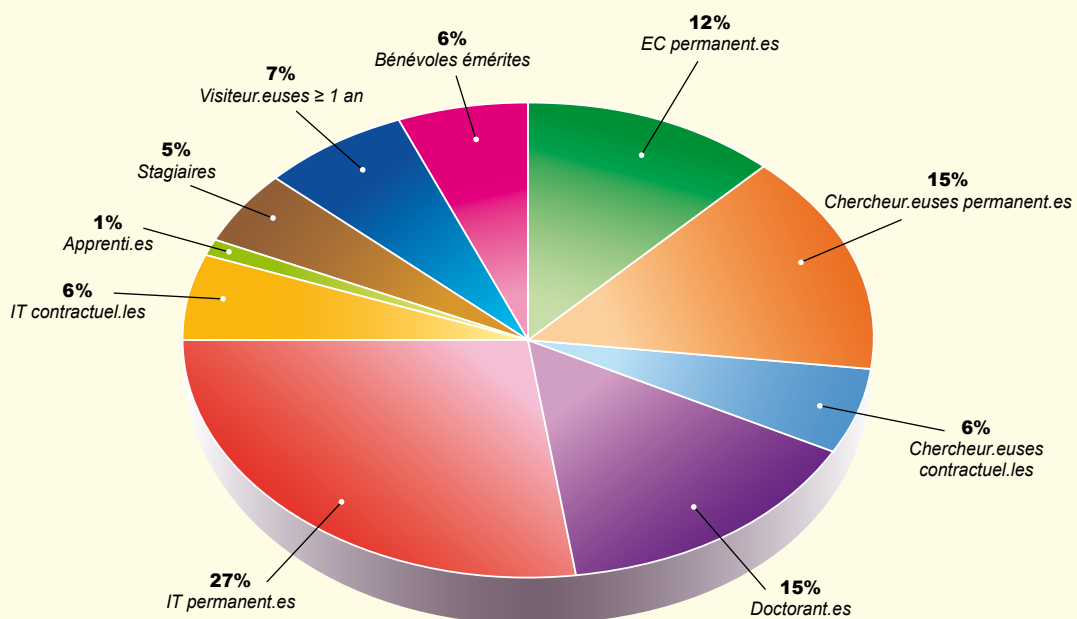
Les services administratifs sont répartis en trois pôles : Ressources Humaines (RH), Gestion Financière et Communication.

Ressources humaines du LPNHE

Le pôle RH assure la gestion administrative des personnels. Cette gestion consiste à réaliser le suivi d'environ 188 agents permanents et non permanents, auxquels il faut ajouter une cinquantaine de stagiaires par an qui séjournent au laboratoire pour des périodes

allant d'une semaine à 6 mois. Le pôle est en charge des procédures de recrutement (concours, mobilité interne, auxiliariat), des procédures d'accueil des visiteuses et visiteurs étrangers, de stagiaires ou de doctorantes et doctorants (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, absences des agents et diffuse toutes les informations utiles aux agents de l'unité.

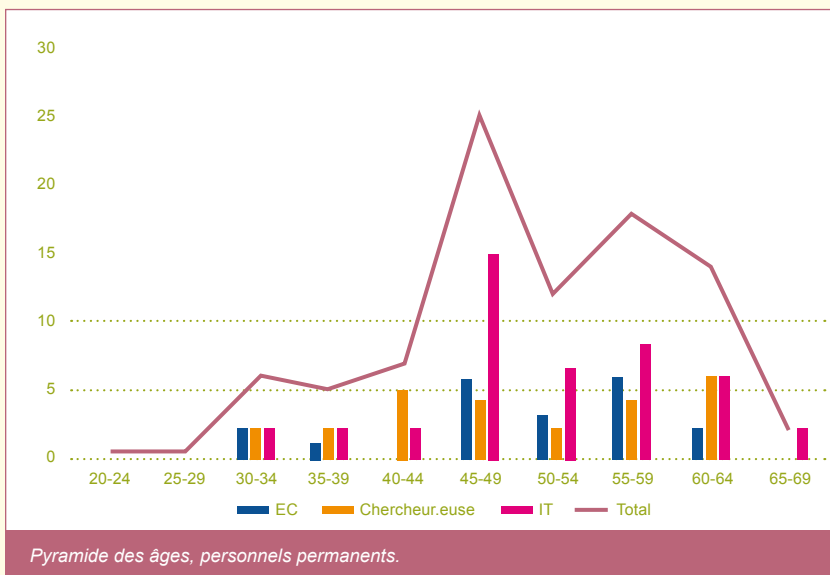
Au 31 décembre 2025, le laboratoire compte 45 enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs (EC), chercheuses et chercheurs, 10 émérites et bénévoles, 24 doctorantes et doctorants, 53 ingénieures, ingénieurs, techniciennes et techniciens (IT) permanents et non permanents, 1 IT en alternance, et 9 stagiaires, soit un total de 165 personnes (voir graphique ci-dessous). De plus, il convient de préciser que le LPNHE a accueilli 82 stagiaires.



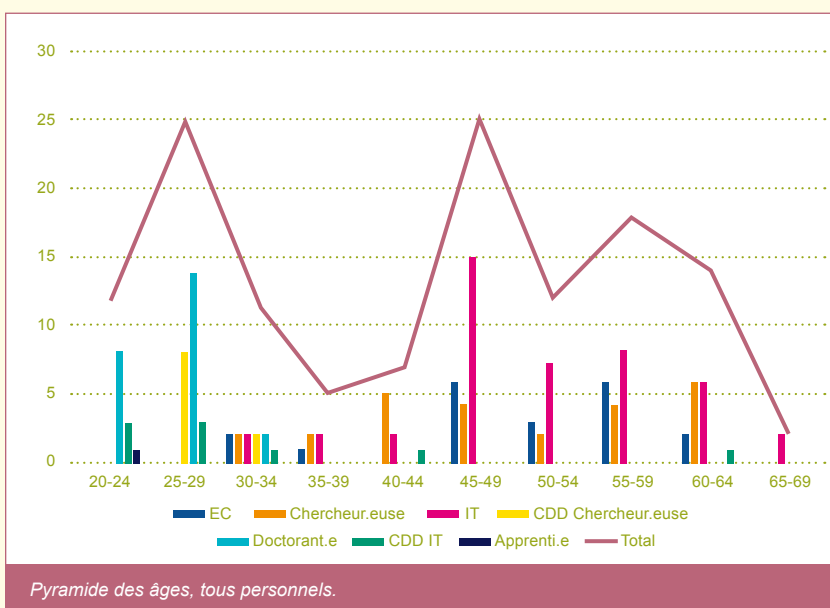
Répartition par catégorie des personnels.

Le graphique ci-dessous 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 laboratoire a eu le souci de bien anticiper les recrutements dans une optique de remplacement. Ainsi, l'unité a eu l'opportunité de recruter

des personnels permanents par la mobilité interne au CNRS et des personnels non permanents par le biais de financement sur des contrats de recherche (ANR, contrats européens, ERC...). Cela a permis de retrouver le nombre d'agents antérieur à 2022 et de retrouver une relative stabilité des personnels.



En incluant les personnels non permanents, la pyramide est plus équilibrée avec les doctorant.es et les postdoctorant.es, dans le graphique ci-dessous.



●●● Services de l'administration

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, NSIP, RESEDA, SIRHUS, et WEBCONTRAT (CANOPE) 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 contrac-

tuels, d'une durée supérieure à trois mois, doit être obligatoirement publié 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.

Équipe du pôle Ressources Humaines :

Yolande Bonnet, Évelyne Mephane,
Marjorie Stievenart-Ammour, Yves-Patrick Tchuenbou

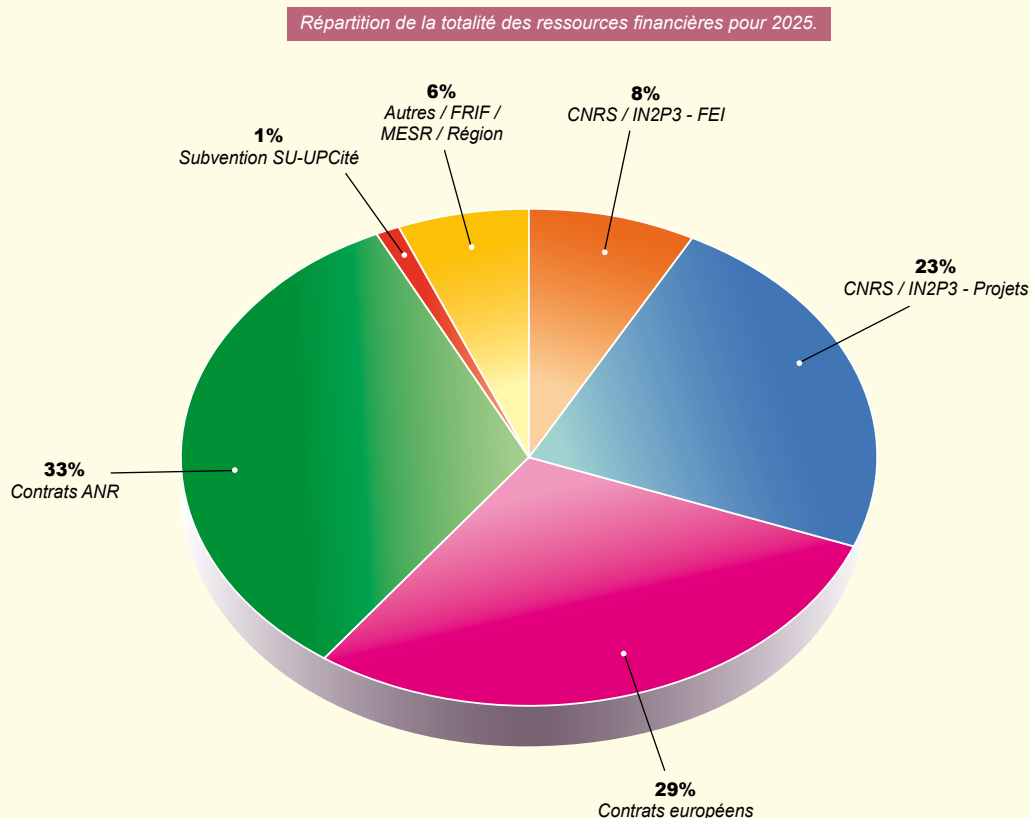
Ressources financières du LPNHE

Le LPNHE dispose de ressources financières qui lui sont attribuées par ses trois tutelles, CNRS/IN2P3, les Universités Sorbonne Université et Paris-cité, ainsi que de ressources propres représentant un budget global hors salaires d'environ 3,5 millions d'euros par an. Ces ressources sont gérées par le pôle de gestion financière, composée 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 la totalité des ressources financières est représentée sur la figure ci-dessous pour l'année 2025.

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

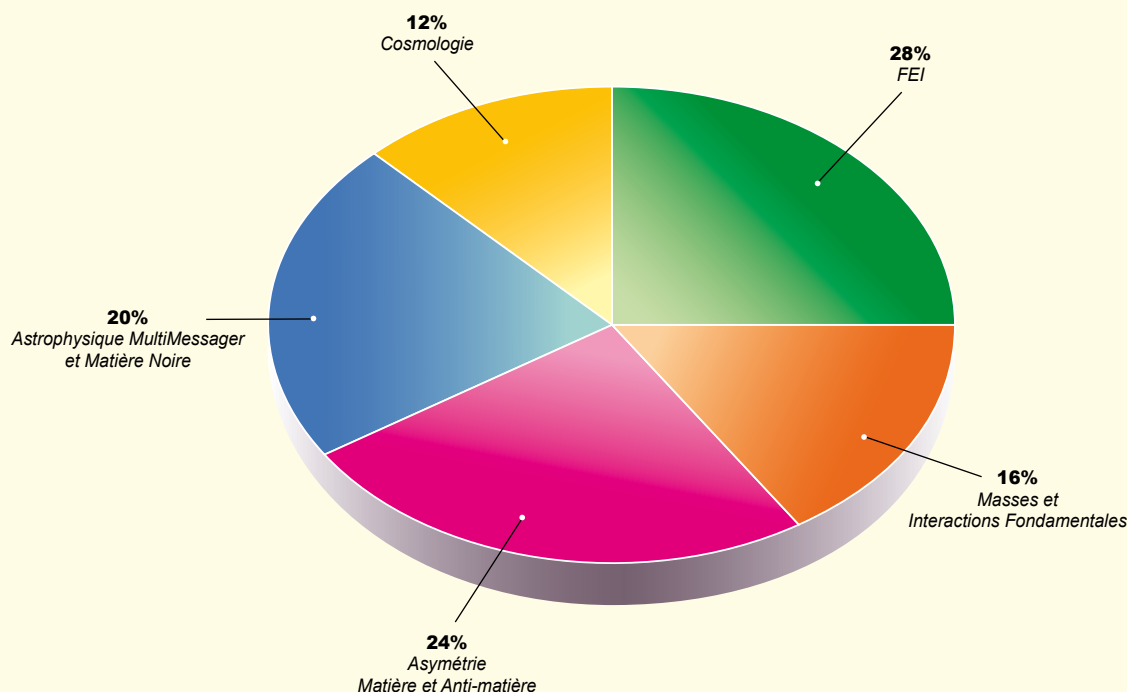


En 2025, la dotation annuelle (FEI) CNRS a représenté 8 % du budget et celle de ses tutelles universitaires (Sorbonne Université et Université Paris Cité) 1%. Ces budgets sont alloués au fonctionnement du laboratoire pour les dépenses d'infrastructure, de fonctionnement, de petits équipements et aussi pour financer des colloques, écoles et conférences.

Le reste du budget, destiné aux projets du laboratoire, provenait, en 2025, du CNRS/IN2P3 (31%), de contrats ANR, Européens, Région et LABEX (68%).

Affectations des ressources CNRS dans les projets

Thématiquement, le budget « Projets » s'est réparti en 2025 (voir graphique ci-dessous) selon : - Masses et interactions fondamentales (16%) - Asymétrie Matière et Antimatière (24%) - Astrophysique MultiMessenger et Matière Noire (20%) - Cosmologie (12%).



Gestion des ressources financières

La gestion financière du LPNHE s'appuie sur plusieurs applications dont certaines sont citées ci-dessous :

- GESLAB, DMF, RESEDA : base gestion des unités de recherche du CNRS
- ETAMINE, NOTILUS et GOELETT : progiciels relatifs à la gestion et au traitement des missions
- PUMA : plateforme de dématérialisation des marchés des laboratoires
- WEBCONTRAT (SIGFIC) : gestion des contrats de recherche (ANR, contrats européens, ERC...)

Évolutions

Le budget projet IN2P3 est apparu relativement stable entre 2024 et 2025 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

●●● Services de l'administration

l'automne 2017, un ERC Consolidator Grant et en 2018, un ERC Advanced Grant. Ces deux ERC ont été prolongés, en raison de l'impact de la pandémie COVID 19, ils sont désormais achevés.



Les gestionnaires continuent à s'adapter à la mise en place de la dématérialisation de la dépense, notamment à la nouvelle version de l'outil PUMA. Cela entraîne pour les gestionnaires de grandes évolutions dans les méthodes de travail et dans l'acquisition de nouvelles compétences techniques et professionnelles, notamment le visa électronique, l'archivage numérique sur GESLAB et NOTILUS...

Équipe du pôle Gestion financière :

Swarna Latha Bassava, Carla Carvalhais, Évelyne Mephane, Marjorie Stievenart-Ammour, Irène Djambou-Tchuenbou, Yves-Patrick Tchuenbou

Le service administration

Liste des personnels administratifs au 31 décembre 2025 :

Swarnalatha Bassava, Yolande Bonnet, Carla Carvalhais, Isabelle Cossin, Évelyne Mephane, Marjorie Stievenart-Ammour, Irène Djambou-Tchuenbou, Yves-Patrick Tchuenbou



Communication et documentation

Le pôle « Communication et Documentation » met en œuvre ses missions au moyen d'un plan de communication pluriannuel élaboré en coordination avec le directeur du laboratoire et aligné sur la stratégie de l'institut IN2P3 du CNRS. Ses enjeux principaux sont :

- la valorisation et la diffusion des activités ainsi que des résultats scientifiques et techniques du LPNHE ;
- la promotion auprès de publics ciblés - grand public, milieu scolaire, acteurs institutionnels - des thèmes de recherche de l'unité en physique des particules, astroparticules et cosmologie en élaborant des outils de communication adaptés.

Le pôle s'appuie sur des « chargé.es de mission communication interne » pour les actions de la vie du laboratoire (biennale, séminaires, réunions du vendredi, expositions...). L'ensemble du personnel est également ponctuellement mobilisé pour les actions de communication externe, après constitution de comités d'organisation, ce qui permet de renforcer les projets tels que la Fête de la science (voir page 120), les journées scientifiques, le rapport d'activité, les différentes rencontres de physique (colloques, conférences, workshop, symposium). Quant aux correspondant.es, leur mission s'adresse à des actions récurrentes comme les MasterClass, la valorisation du patrimoine, ...

Événements marquants et innovations en médiation scientifique

Rencontres de Moriond

Le Laboratoire est lié aux Rencontres de Moriond depuis plusieurs années, hébergeant l'association qui s'en occupe ainsi que divers membres de comités scientifiques et d'organisation. Cette conférence internationale, qui fête en 2026 ces 60 ans, rassemble aujourd'hui plus de 500 participantes et participants par an, et est devenue une référence où les résultats de grandes et petites collaborations sont annoncés en avant-première. Son objectif est de rapprocher doctorantes et doctorants, spécialistes, expérimentatrices,

expérimentateurs, théoriciens et théoriciennes autour de sessions dédiées à des thématiques spécifiques.



Conférence internationale BridgeQG 2025.

Voici un exemple mettant en lumière un projet-pilote de communication au CNRS, mis en œuvre par le pôle à l'occasion de l'organisation de la conférence internationale BridgeQG 2025⁽¹⁾ tenue du 7 au 10 juillet 2025 dans le cadre de la COST ACTION⁽²⁾ Européenne CA23130⁽³⁾.

Une centaine de participant.es a été accueilli pour traiter des progrès récents de la recherche concernant la Gravitation Quantique, avec des contributions dans le domaine de la théorie, de la phénoménologie et des expériences. Par ailleurs, une conférence grand public a été organisée en marge de la conférence avec Philippe Jetzer, Université de Zürich, sur « La gravitation : de la relativité générale à la gravitation quantique ».

Mais l'exemple remarquable est la mise en place d'une crèche éphémère permettant d'offrir aux participant.es de la conférence un mode de garde pour leurs enfants pendant le colloque. Ce projet-pilote a entièrement été financé grâce au prix européen de l'égalité durable entre les femmes et les hommes dont le CNRS a été lauréat en mai 2024. Le PDG du CNRS ayant décidé de consacrer la totalité du prix, d'un montant de 100 000 €, à financer les solutions de garde d'enfants organisées pendant la durée des colloques.

●●● Communication et documentation

Collaborations avec la Société Française de Physique (SFP)

Le pôle organise aussi chaque année plusieurs événements avec la Société Française de Physique SFP. Notamment les Journées Jeunes Chercheurs JRJC qui ont eu lieu en 2024 du 24 au 30 novembre et en 2025 du 30 novembre au 6 décembre à l'abbaye de Saint Jacut de la mer (85). C'est l'occasion pour les jeunes doctorantes et doctorants en deuxième année de thèse, dans nos disciplines, de se rencontrer et initier leur réseau professionnel.

Rencontres PIF

Les Rencontres Physique et Interrogations Fondamentales (PIF), organisées en partenariat avec la bibliothèque nationale de France ont réuni plus de 350 personnes, sur site et en ligne, samedi 15 novembre 2025 sur le sujet « Question de principes » : les **principes scientifiques**, loin d'être des fondements immuables, sont des constructions explicatives sans cesse questionnées, révisées et diversifiées selon les disciplines, au cœur de débats scientifiques, philosophiques et éthiques.

Olympiades de Physique

Dans le cadre des Olympiades Internationales de Physique, que la France a accueilli en 2025⁽⁴⁾, près de 400 candidates et candidats venus du monde entier ont participé à cet événement. Beaucoup poursuivront leurs études dans les meilleurs établissements, et certains rejoindront peut-être, à terme, nos propres laboratoires. À cette occasion, les organisateurs ont sollicité Sorbonne Université pour accueillir, le 22 juillet 2025, plusieurs groupes d'étudiant.es pour des visites scientifiques, soit environ une centaine de participant.es ré-



Un groupe d'étudiant.es de Malaisie lors des Olympiades Internationales de Physique visitent Xelab.

partie tout au long de la journée. Le LPNHE a, pour sa part, ouvert ses portes à une dizaine d'étudiants, qui ont pu assister à des présentations dédiées et découvrir le laboratoire au cours d'une visite guidée.

Informations internes

Outre les réunions et rendez-vous réguliers, l'information transite également sur supports numériques et papier. Ainsi le site web du laboratoire est régulièrement mis à jour, notamment avec des actualités issues des informations fournies par les groupes et services. Avec l'aide du service informatique, le laboratoire maintient également à jour des écrans d'information dans les lieux de vie (cafétériats, amphi Charpak), qui mentionnent les actualités, les séminaires, les réunions à venir.

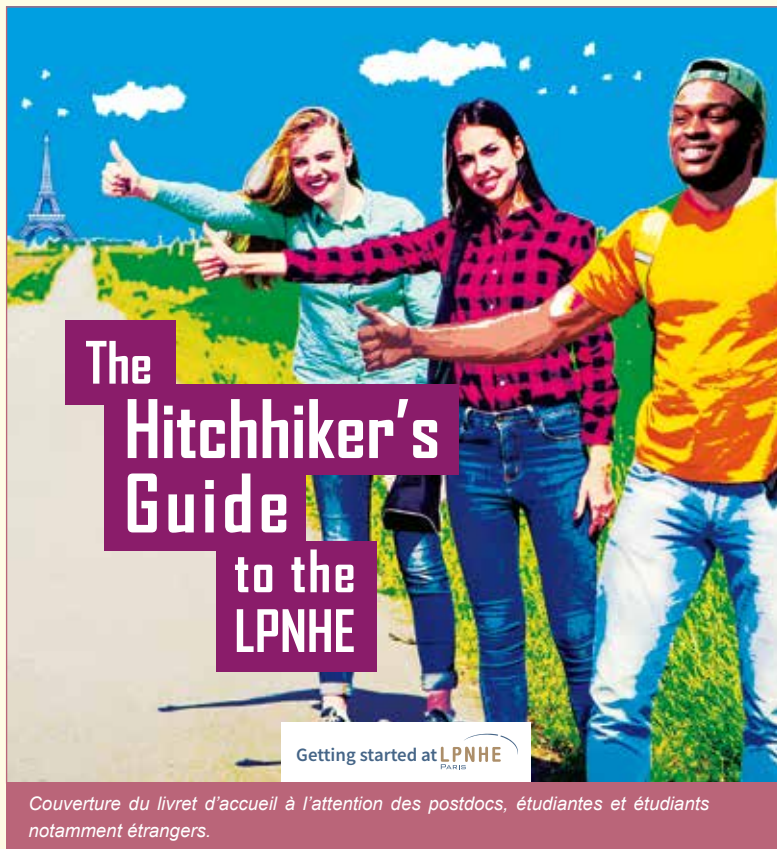
¹ <https://indico.in2p3.fr/event/34939/>

² Une action COST est un réseau européen de recherche interdisciplinaire qui réunit des chercheurs et des innovateurs pour étudier un sujet de leur choix pendant quatre ans. Les actions COST regroupent généralement des chercheurs issus du monde universitaire, des PME, des institutions publiques et d'autres organisations ou parties prenantes.

³ <https://www.cost.eu/actions/CA23130/>

⁴ <https://www.ipho2025.fr/>

Dernièrement, un guide d'accueil détaillé à l'attention des postdocs, étudiantes et étudiants notamment étrangers a été réalisé et distribué. Il permet de retrouver l'essentiel de ce qu'il est important de savoir en arrivant sur Paris, au laboratoire (contacts, documents nécessaires, transports publics, logement, santé, etc.).



Couverture du livret d'accueil à l'attention des postdocs, étudiantes et étudiants notamment étrangers.

Documentation

Le personnel du LPNHE dispose d'une bibliothèque de recherche associée à la bibliothèque de Sorbonne Université (BSU). Un physicien chargé de la gestion de la documentation veille à la continuité des abonnements aux périodiques scientifiques et aux magazines spécialisés et prépare l'acquisition de nouveaux ouvrages selon les demandes du personnel. Les membres du laboratoire ont accès à de nombreuses revues en ligne, à travers la bibliothèque de Sorbonne Université et le portail BibCNRS. Le fonds de la bibliothèque du LPNHE est constitué d'un peu plus de 2000 monographies spécialisées couvrant les domaines du LPNHE : physique des particules, physique nucléaire, astrophysique, cosmologie et instrumentation associée. Ce fonds est intégré au catalogue général de Sorbonne Université et au catalogue national du SUDOC. La gestion des prêts de ces ouvrages s'effectue via un automate de prêt muni d'un lecteur de codes-barres : les utilisateurs et utilisatrices ont ainsi la possibilité d'emprunter et de rendre les ouvrages de manière autonome, 7j/7 et 24h/24.

Équipe communication et documentation :

Tristan Beau, Isabelle Cossin,
Frédéric Derue, Laurent Le Guillou,
Vera de Sà-Varanda, Sophie Trincaz-Duvoid



La bibliothèque du laboratoire.

Services généraux

Pôle logistique et maintenance

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, vidéoconférence). Le service maintient à jour le matériel de visioconférence pour s'adapter aux évolutions des logiciels utilisés ;
- gérer et entretenir le mobilier et les équipements généraux et établir et maintenir à jour leur inventaire ;
- établir le planning d'occupation des bureaux avec l'aide d'un logiciel de gestion du personnel, permettre l'installation des nouveaux arrivants et gérer les accès avec le système de clef programmable mis en place par l'université ;
- gérer l'utilisation de l'amphithéâtre Georges Charpak, 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 ;
- aider à la gestion logistique des transferts internationaux des grands équipements fabriqués au LPNHE, notamment le chiffrage, l'interaction avec les entreprises de logistique, la préparation documentaire.

Le pôle logistique et maintenance prend en charge, en collaboration avec les services techniques du campus, un nombre important d'activités diverses permettant directement ou indirectement la poursuite du programme scientifique du laboratoire dans de bonnes conditions matérielles. Le pôle est aussi un acteur du maintien d'un environnement de travail de qualité.

Équipe :

Aurélie Bořan, Michaël Roynel

CHIFFRES CLEFS

100 réservations externes de salles par an.

Travaux et réaménagements

Remplacement du système de traitement d'air des salles blanches

Dans le cadre de la préparation de la production des modules de détecteurs pour l'upgrade ATLAS (ITk) et de la mise en production de la plateforme CLAP, le laboratoire a mené à bien le remplacement urgent du système de traitement d'air des salles blanches, une infrastructure critique de 95 m² dédiée à la fabrication et à la caractérisation des détecteurs à semi-conducteurs. Ce projet, réalisé dans un local technique aux contraintes spatiales extrêmes, a dû s'adapter à des exigences strictes :

- conservation de l'infrastructure existante des salles et de leurs réseaux aérauliques, limitant toute modification structurelle majeure ;
- en conséquence, le traitement de l'hygrométrie a été restreint à l'air neuf, afin de préserver les installations en place ;
- présence d'équipements sensibles dans les salles pendant les travaux, imposant une coordi-

nation rigoureuse pour éviter toute contamination ou endommagement ;

- logistique rigoureuse : les livraisons et interventions ont été coordonnées avec l'université pour minimiser les perturbations des activités en cours et assurer la sécurité.

Conduit dans le cadre d'un marché public de travaux, suivi par le responsable du service mécanique du LPNHE, ce projet a bénéficié du soutien de la délégation régionale Paris Centre du CNRS pour la préparation et le suivi des procédures administratives et techniques. Il a requis une solution sur mesure adaptée aux fortes contraintes spatiales et techniques. Le calendrier, rigoureusement respecté, a permis de sélectionner le maître d'œuvre fin 2023, de préparer l'appel d'offres au printemps 2024 puis de lancer la consultation en juin 2024. Après une phase de négociation, une offre a été retenue en novembre 2024, suivie d'une réunion de lancement en janvier 2025. Les travaux, démarrés en avril 2025, ont abouti à la réception de l'installation en septembre 2025, sécurisant ainsi les conditions nécessaires à la reprise de la production des détecteurs.

Ce projet s'inscrit dans une dynamique globale de modernisation des infrastructures du laboratoire, en synergie avec la plateforme de fabrication et caractérisation des détecteurs à semi-conducteurs, et les services généraux, pour la gestion technique et logistique des installations.

S'appuyant sur la technicité des membres des services techniques du LPNHE, cette opération illustre l'engagement du laboratoire à maintenir des installations de pointe, essentielles pour répondre aux enjeux scien-



Système de traitement d'air des salles blanches avec son armoire en cours de câblage.

tifiques dont le projet ATLAS, tout en surmontant des contraintes techniques, logistiques et réglementaires exceptionnelles.

Réaménagements en salles expérimentales

Sur la période couverte par ce rapport, un travail de réaménagement des salles de test et de stockage a été mené par les services généraux afin de répondre aux besoins des groupes de recherche. Ainsi :

- la salle dite StarDICE (1213-SS-07) a été réaménagée avec l'installation d'un plafond soufflant pour l'expérience ITk notamment pour tests et production,
- la salle dite HESS (1222-SS-05) a été réaménagée pour les nouveaux besoins de l'expérience StarDICE,
- la salle de fabrication de circuits imprimés a été transformée en FabLab (voir page 85),
- la salle de stockage 1213-SS-11 a été réaménagée afin d'accueillir la R&D NuCube,
- et enfin dans la salle de stockage 2223-SS-04 après tri, recyclage et mise au rebut et mise au rebut du matériel obsolète, un nouveau plafond soufflant a été installé, pour les futurs besoins de tests et de logistique pendant les productions des *upgrades* ATLAS.



Le nouveau plafond soufflant en service.

Suivi des travaux de réfection des locaux suite aux infiltrations d'eau

Enfin, depuis de nombreuses années, plusieurs pièces (ateliers mécaniques et électroniques, salle des séminaires, atelier câblage, deux bureaux) étaient affectées par des infiltrations d'eau, nuisant à leur usage, allant jusqu'à la condamnation d'un bureau. L'analyse de la situation et des actions possible a été longue,



●●● Services généraux

mais avec l'aide de notre hébergeur Sorbonne Université, des travaux de réfection ont pu être menés en 2025, permettant de retrouver une situation saine et des locaux fonctionnels. Ces travaux, suivis par les services généraux, ont consisté en une décontamination des locaux, la dépose du BA13 endommagé, la pose d'un nouveau BA13 et réfection des peintures dans toutes ces salles.



Atelier mécanique bâché en prévision des travaux.



Atelier mécanique après réfection.



Salle des séminaires bâchée en prévision des travaux.



Salle des séminaires après réfection.

Hygiène et sécurité

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 hébergeur (Sorbonne Université) le Directeur du LPNHE est assisté dans cette mission par deux Assistants de Prévention (AP) placés sous sa responsabilité directe. Un ingénieur d'études et une assistante-ingénieure assurent cette fonction. Les AP entretiennent une étroite collaboration autant avec les services de prévention des risques professionnels de la délégation CNRS-Paris Centre, de Sorbonne Université et de l'Université de Paris, qu'avec le service sécurité incendie de Sorbonne Université-Jussieu ainsi qu'avec les médecins du travail. Concernant le suivi des risques particuliers que sont les risques aux rayonnements ionisants et ceux liés aux rayonnements optiques artificiels, deux personnes « référentes » complètent le dispositif de prévention : une Personne Compétente en Radioprotection (PCR) 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 12 décembre 2024 et le 5 décembre 2025.

Concernant le suivi des expériences, un travail de conseil est apporté aux groupes du laboratoire pour que les appareillages qu'ils conçoivent soient conformes aux normes de sécurité, et un travail de prévention est essentiel pour la bonne utilisation des appareils et des produits présentant un risque (liquides cryogéniques, de gaz comprimés, ...). Une commission de sécurité dédiée à chaque expérience présentant des risques apporte des conseils et assure 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.



Illustration d'un équipement de protection individuel (EPI) : protection auditive sur mesure.

URGENCES, Ayez le bon réflexe !	
En cas d'incendie ou lors problèmes lors des heures de bureau	7 55 55
Une blessure, un problème de santé	7 55 55
Service hospitalier et urgences	7 55 65
Un problème technique	7 55 55
Service sécurité	7 55 57

Exemple d'affiche de sécurité de salle expérimentale : cas de Xelab.

●●● Hygiène et sécurité

L'ensemble des locaux est pourvu d'équipements pour la lutte contre l'incendie : système d'alarme, portes coupe-feu, extincteurs, extraction des fumées. L'entretien en est assuré par Sorbonne Université. Au vu du risque élevé, une installation dédiée a également été mise en place à l'intérieur des salles serveurs informatiques, dotée d'un système d'extinction automatique par gaz inerte. Afin d'anticiper d'éventuels sinistres, des exercices d'évacuation sont organisés deux fois par an par le personnel du Service Sécurité Incendie de l'université.



L'une des bouteilles d'argon dans les salles serveurs, assurant un élément de lutte contre les éventuels incendies.

Concernant les premiers secours, le laboratoire s'est équipé de 3 défibrillateurs cardiaques automatiques et de 3 armoires de premiers secours, desservant les différents secteurs du LPNHE.

12 agents du LPNHE ont reçu la formation de Sauveteurs Secouristes du Travail, dont 4 sur la période 2024 / 2025.



Défibrillateur automatisé externe (DAE) installé au rez-de-chaussée du laboratoire.

En interne, un accueil des nouveaux entrants au laboratoire a été institué annuellement, incluant un volet d'information et de sensibilisation « Santé et Sécurité », mais aussi sur la « Prévention et l'Information des Violences Sexistes et Sexuelles, et les Discriminations ».

Depuis 2011, le LPNHE s'est pourvu de dispositifs de protection pour travailleurs isolés : 14 zones, principalement des salles à risques et isolées comme les salles blanches, les salles serveurs informatiques et le hall de montage, sont équipées d'émetteurs DATI/PTI. Ces appareils permettent la surveillance du personnel en situation isolée (détection d'absence de mouvements ou de verticalité) et donnent l'alerte via une centrale connectée au réseau téléphonique.

Concernant les questions de sécurité liées spécifiquement à l'exposition aux rayonnements ionisants, un enseignant-chercheur assure les missions

de Conseiller en Radioprotection (CRP) ; il est en charge depuis 2016. Les missions du Conseiller en Radioprotection (CRP) sont définies par la réglementation (articles R4451-123 du Code du Travail et R1333-19 du Code de la Santé Publique). Elles couvrent notamment l'évaluation des risques, la gestion de la dosimétrie, l'organisation des contrôles périodiques, le suivi des sources radioactives ou générateurs de rayonnements ionisants, et l'information du personnel. Bien que l'usage de sources radioactives ait diminué sur la période 2024-2025, le générateur X du laboratoire est exploité de manière routinière sous régime d'exemption (tension < 30 kV, débit d'équivalent de dose < 1 μ Sv/h à 10 cm). Le CRP réalise des contrôles réguliers pour vérifier l'absence de fuites de rayonnement. Plusieurs groupes de recherche ont par ailleurs annoncé leur intention de débiter de nouvelles activités impliquant des sources ionisantes. Dans le cadre de la jouvence du détecteur proche d'Hyper-Kamiokande, le groupe du LPNHE développera des détecteurs à scintillateur liquide testés avec une source de strontium-90. Le groupe XENON et le CRP préparent, pour le projet XeLab, l'installation d'une source non scellée de krypton-83m destinée au calibrage de la chambre à projection temporelle. Enfin, le développement de la chaîne d'acquisition de l'expérience PIONEER au PSI nécessitera l'emploi de sources de strontium-90

et de césium-137. Ces nouvelles activités impliqueront une modification de l'enregistrement ASN du LPNHE, actuellement en cours sous la responsabilité du CRP.

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).

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 septembre 2025.

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.

Équipe :

Julien Bolmont, Carla Carvalhais,
Francesco Crescioli, Alexandre Lantheaume

Enseignement supérieur et formation par la recherche

■ Implication dans l'enseignement supérieur

- Formation en Licence : socle et responsabilités
- Cycle Master : spécialisation et pilotage
- Plateforme de physique nucléaire parisienne
- Formation en alternance

■ Thèses au LPNHE

- Recrutement des doctorantes et doctorants
- Financements des thèses
- Accueil et suivi des doctorantes et doctorants au LPNHE

■ Stages au laboratoire

- Formations d'origine des stagiaires
- Thématiques des stages
- Accueil au laboratoire



Enseignement supérieur et formation par la recherche

Le LPNHE place la formation et la diffusion des savoirs au cœur de ses missions. Le corps enseignant-chercheur du laboratoire, qui compte une vingtaine de membres rattachés à Sorbonne Université (SU) ou à Université Paris Cité (UPCité), enseigne à tous les niveaux, de la licence au doctorat, et a une implication forte dans les institutions universitaires et les responsabilités pédagogiques (voir les responsabilités page 133). Cette présence active consolide la visibilité et le rayonnement du laboratoire auprès de ses universités de tutelle.

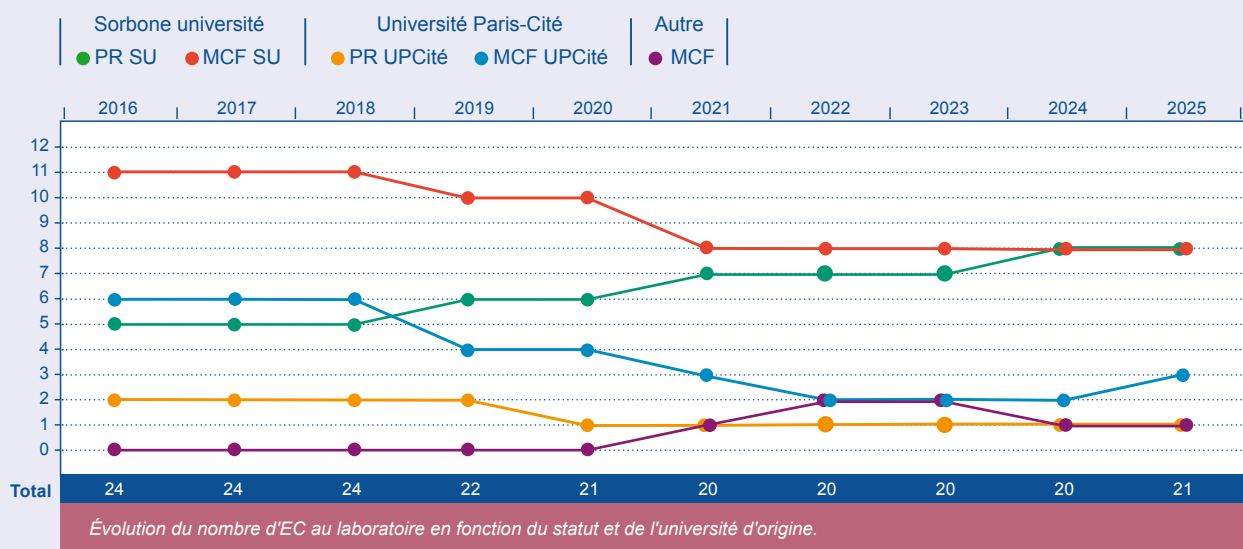
Les enseignements dispensés vont des concepts fondamentaux aux résultats récents de la recherche et

prennent aussi bien la forme de cours magistraux et travaux dirigés ou pratiques. Cet engagement est partagé par l'ensemble du laboratoire : de nombreux membres des équipes scientifiques, techniques et administratives interviennent chaque année comme formateurs et formatrices lors d'écoles thématiques.

La formation par la recherche constitue un autre pilier majeur de l'unité, notamment par l'encadrement doctoral (voir plus loin la section "Thèses au LPNHE") ou l'accueil chaque année d'une cinquantaine de stagiaires dont les niveaux vont de la classe de troisième au Master 2 (voir la section "stages" page 105).

Implication dans l'enseignement supérieur

Le LPNHE est fortement ancré dans le paysage universitaire : près de la moitié des membres des équipes de recherche relève du corps enseignant-chercheur (EC) de SU ou de UPCité.



À ces titulaires s'ajoute une dizaine de doctorantes et doctorants chargés d'enseignement. Cet engagement pédagogique mobilise également les personnels ingénieurs, chercheuses et chercheurs du CNRS, dont les interventions prennent place de l'université aux grandes écoles, des écoles thématiques de l'IN2P3 aux écoles d'été.

Au sein des deux universités tutelles, les enseignements couvrent l'ensemble du cursus (Licence, Master, Doctorat). Si les enseignements prennent essentiellement place au sein des UFR de Physique, des enseignements sont également dispensés en Mathématiques ou en première année des études de santé. Les domaines d'expertise trans-

mis reflètent l'excellence du LPNHE : physique des particules et des astroparticules, cosmologie observationnelle, instrumentation, traitement de données, électronique et informatique.

Formation en Licence : socle et responsabilités

L'implication pédagogique débute dès les premières années (L1 à L3). Au-delà des thématiques de recherche du laboratoire, les membres du LPNHE assurent la transmission de la physique générale (mécanique, thermodynamique, physique quantique et nucléaire, etc.). Cette mission va de pair avec de fortes responsabilités, les membres du laboratoire assurant la direction de plus de vingt unités d'enseignement, dont certaines accueillent plus de 800 étudiantes et étudiants.

Cycle Master : spécialisation et pilotage

En première année de master (M1), les enseignements se concentrent davantage sur le cœur de métier du laboratoire, notamment la physique des particules, la physique nucléaire, le numérique et les interactions particules-matière et l'ingénierie nucléaire. Ces cours s'inscrivent dans divers parcours de SU et d'UPCité, incluant le master international Paris Physics Master.

En deuxième année (M2), le LPNHE co-pilote trois spécialités majeures :

- *Noyau, Particules, Astroparticules et Cosmologie (NPAC)*. Cette formation offre un équilibre entre théorie, modélisation et instrumentation. La co-responsabilité de ce parcours, porté en partenariat entre SU, UPCité et Université Paris-Saclay, est assurée par trois scientifiques du laboratoire. Les interventions y portent sur les hautes énergies et l'instrumentation associée.
- *Capteurs, Instrumentation et Mesures (CIMES)*. Orientée vers les applications environnementales, médicales et industrielles, cette formation, portée par SU et l'ESPCI, bénéficie de l'expertise du LPNHE en traitement du signal, modélisation d'expériences et grands instruments. La co-direction pédagogique est assurée par un membre du laboratoire.
- *Ingénierie Nucléaire (IN)*. Ce parcours forme aux enjeux du génie civil et de la gestion des ressources nucléaires. Des personnels du laboratoire y assurent des enseignements et des travaux pratiques dédiés à la physique nucléaire et aux techniques d'instrumentation.

Enfin, la direction adjointe du Master de Physique Fondamentale et Applications de SU est assuré par une EC du laboratoire.

Plateforme de physique nucléaire parisienne

Une plateforme de physique nucléaire, commune à SU et UPCité, est basée sur le campus Pierre et Marie Curie de Sorbonne Université. Elle est sous la responsabilité d'un EC du laboratoire. Elle forme le support pratique indispensable des TP de physique nucléaire pour les deux universités, en licence et master, assurant la formation des étudiantes et étudiants dans ce domaine de compétence du laboratoire.

Formation en alternance

Les services techniques du laboratoire accueillent plusieurs apprenti.es qui se forment en alternance, et ce de tous niveaux. Sur la période 2024-2025, nous comptons quatre apprenti.es au sein de nos services (un en mécanique en BTS de 2 ans, une en électronique/instrumentation, deux en informatique BTS et M2), et des propositions d'apprentissage pour 2026 sont en cours de rédaction, avec une volonté affichée d'une répartition entre les trois corps de métiers techniques : mécanique, informatique et électronique. Le bilan des campagnes d'apprentissage est très positif et permet de préparer le vivier des recrutements à venir : les apprentis en BTS continuent leurs études, et notre apprenti en informatique niveau M2 a rejoint le LPNHE en CDD en vue d'un recrutement pérenne. Il gère actuellement le projet de *cluster IA/GPU* du LPNHE.



Thèses au LPNHE

Le LPNHE s'investit pleinement dans sa mission de formation par la recherche en accueillant chaque année en moyenne 8 nouveaux doctorants et doctorantes. 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.

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 étudiants et les étudiantes, 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 UPCité, par l'organisation de visites du laboratoire ou encore grâce à une politique de stages volontariste auprès des L3 et M1. Ainsi, beaucoup des doctorantes et doctorants du laboratoire y ont fait un stage avant la thèse.

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 dans lesquels des personnels du laboratoire sont investis et qui permettent la mobilité d'étudiants.

Sur la période 2024-2025, entre celles ou ceux qui ont soutenu leur thèse en 2024 (donc avec début de thèse en 2021) ou qui l'ont commencée en 2025, 46 doctorantes et doctorants ont été présents au LPNHE comme le montre la **figure 1** qui indique les années de début de thèse avec un historique remontant à 2019. On peut remarquer que le laboratoire accueille en moyenne chaque année 8 nouveaux doctorants ou doctorantes avec un pic de 15 démarrages en 2022.

Sur les étudiantes et étudiants ayant démarré sur les 7 dernières années, 29 % sont des femmes et 48 % sont étrangers comme le montre la **figure 2** qui représente les 15 nationalités de ces étudiants.

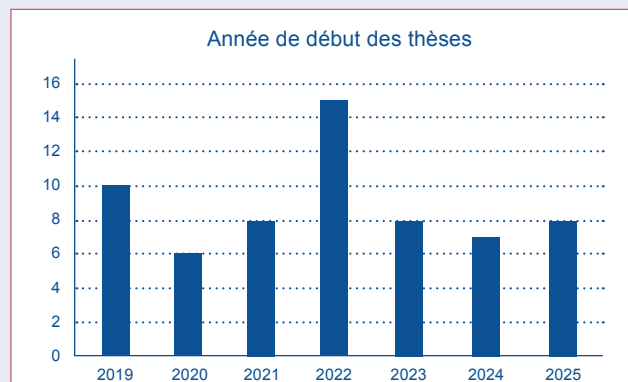


Figure 1 : Année de début de thèse des étudiants présents au LPNHE entre 2019 et 2025.

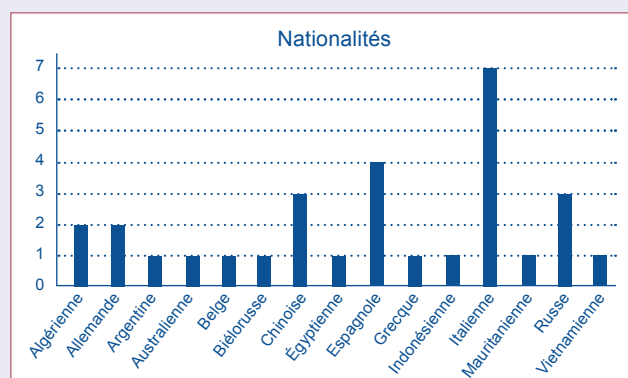


Figure 2 : Nationalités des 30 étudiantes et étudiants étrangers présents au LPNHE entre 2019 et 2025.

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 UPCité) et dans 3 Ecoles Doctorales (ED). En 2024, STEP'UP, l'ED à laquelle était affiliée la majorité des chercheuses et chercheurs HDR du LPNHE, a perdu sa tutelle SU et les chercheuses et chercheurs du LPNHE se sont alors affiliés à l'ED PIF. Les étudiantes et étudiants ayant commencé leur thèse en 2023 ont changé d'ED en début de deuxième année de thèse.

La principale source de financements de thèses vient du Ministère de la Recherche et de l'Enseigne-

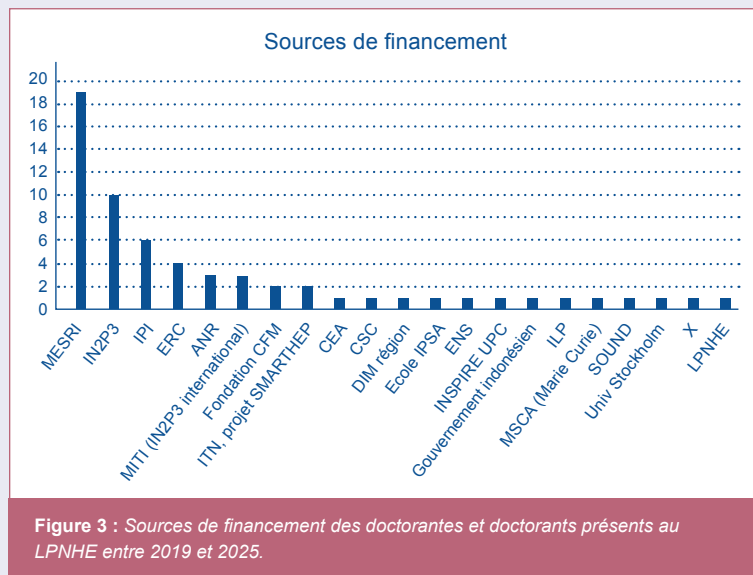
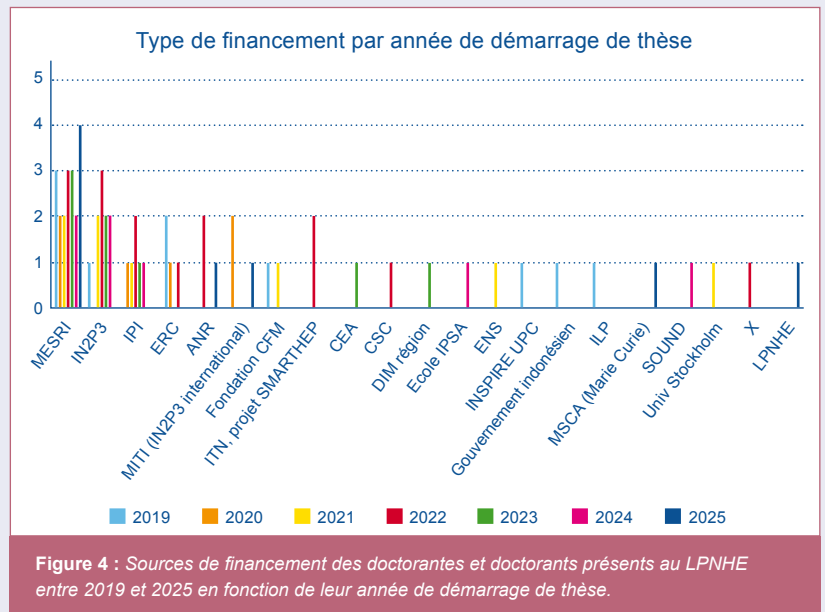
ment Supérieur (MESRI) distribuée par les ED sur la base d'un concours entre étudiants avec examen de dossier et auditions. Jusqu'en 2024, chaque année, le laboratoire accueillait entre 2 et 3 étudiants avec ces financements et en 2025, ce sont 4 étudiants qui ont été lauréats du concours de l'ED PIF et qui ont obtenu ce financement MESRI.

Jusqu'en 2024, l'autre source principale venait de l'IN2P3 (entre 1 et 2 financements par an) sur la base des sujets de thèse et des projets, le choix des étudiants étant laissé à la discrétion des encadrantes et encadrants bénéficiaires du financement. L'IN2P3 a cependant réduit cette source de financement depuis 2024 et le LPNHE n'en a pas bénéficié en 2025.

Comme organismes financeurs jusqu'en 2024, on peut également citer l'Initiative Physique des Infinis (IPI) de SU qui, entre sa création en 2020 et son arrêt en 2024, a financé entre 1 et 2 thèses par an. Par le passé, dans une moindre mesure, la fondation CFM pour la recherche (Capital Fund Management), 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) ont également financé des bourses de thèse.

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 étudiants basés 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 9 doctorats sur la période concernée. La **figure 3** détaille ces sources de financement et la **figure 4** donne une indication de ces financements par année de démarrage de thèse. On peut constater que les sources de financements tendent à se raréfier avec le ralentissement de la politique de financement de thèses par l'IN2P3 et l'arrêt de l'IPI en 2024.



Accueil et suivi des doctorantes et doctorants au LPNHE

L'accueil et le suivi des étudiantes et étudiants en thèse 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 de la **figure 5** les montre rassemblés le jour de l'édition 2025 de cette réunion.

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 exté-

rieur au domaine de la thèse et qui rencontre régulièrement son ou sa filleule pour s'assurer que tout se déroule au mieux, 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.



Figure 5 : Les doctorantes et doctorants du LPNHE lors de leur réunion annuelle de 2025 avec le directeur du laboratoire et la chargée de mission de leur accueil et de leur suivi au laboratoire.

Chargée de l'accueil et du suivi des doctorante.es du LPNHE :

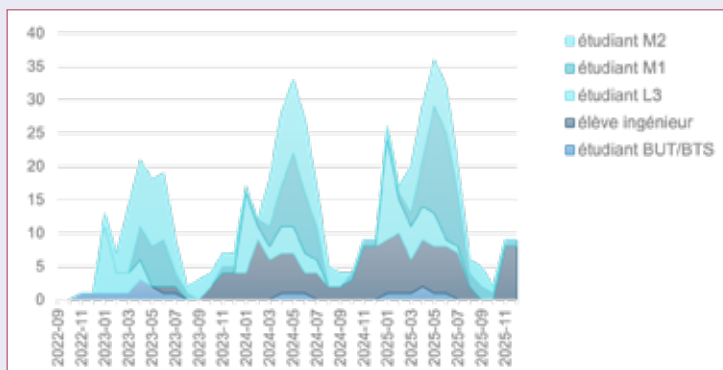
Sophie Trincaz-Duvoid

Équipe des marraines et parrains sur la période 2024-2025 :

Sébastien Bongard, Matthew Charles, Frédéric Derue, Jacques Dumarchez, Daniel Kerszberg, Jean-Philippe Lenain, Olivier Martineau, Irena Nikolic, Luca Scotto-Lavina, Sophie Trincaz-Duvoid
Pauline Zarrouk

Les stages au laboratoire

Chaque année, le LPNHE accueille environ quatre-vingt stagiaires venant de tous les horizons, du collégien à l'étudiante en master. Les cohortes les plus importantes sont issues de licence 3, de master 1, ou de master 2 (voir [tableau page suivante](#)), 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 lycéens en stage d'observation, et un nombre comparable de collégiennes et collégiens. La grande majorité de ces derniers est envoyée par l'UFR de Physique de SU, et découvre en une semaine plusieurs composantes du campus.



Nombre de stagiaires accueillis au laboratoire au cours du temps, depuis la rentrée universitaire 2022.

Formations d'origine des stagiaires

La grande majorité des stagiaires effectue des stages en recherche et vient 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). C'est notamment au printemps que le nombre de stagiaires accueilli est le plus grand (voir figure de la page précédente). Environ la moitié des stagiaires de l'enseignement supérieur, une trentaine par an, provient des deux universités de tutelle ; ce groupe est

souvent motivé par la perspective de continuer vers un M2 recherche du domaine du laboratoire et représentent pour nous un vivier important.

Notre implantation sur le campus Pierre et Marie Curie de Sorbonne Université facilite 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 janvier au laboratoire découvrir le milieu de la recherche. Plusieurs étendent ce stage entre janvier et avril à raison d'une demi ou une journée par semaine avec leur responsable de stage.

ANNÉE	NIVEAU							Total	Total (supérieur)
	Collège	Lycée	BTS/IUT/ Ingénieur	Licence	Master 1	Master 2	Autre		
2023			12	12	8	14	0		46
2024	13	7	18	18	10	13	1	80	60
2025	4	13	16	21	15	10	1	80	63
Total	17	20	46	51	33	37	2		169

Nombre de stagiaires accueillis au LPNHE par année et niveau. Les effectifs de l'enseignement secondaire sont inclus depuis 2024.

Thématiques des stages

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

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 apprenties et apprentis, de plus en plus nombreux.

ANNÉE	THÉMATIQUE					Services Administratif, Techniques ou autre service
	MIF	AMA	AM3N	Cosmologie		
2023	29%	21%	21%	8%		21%
2024	42%	20%	15%	13%		10%
2025	41%	21%	17%	11%		10%

Pourcentage de stages (hors enseignement secondaire) 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.

Chercheuses et chercheurs :

Tristan Beau, Matthew Charles (responsable 09/2023-08/2025), Yajing Xing (responsable 09/2025-),
Contact par courriel : stage@lpnhe.in2p3.fr

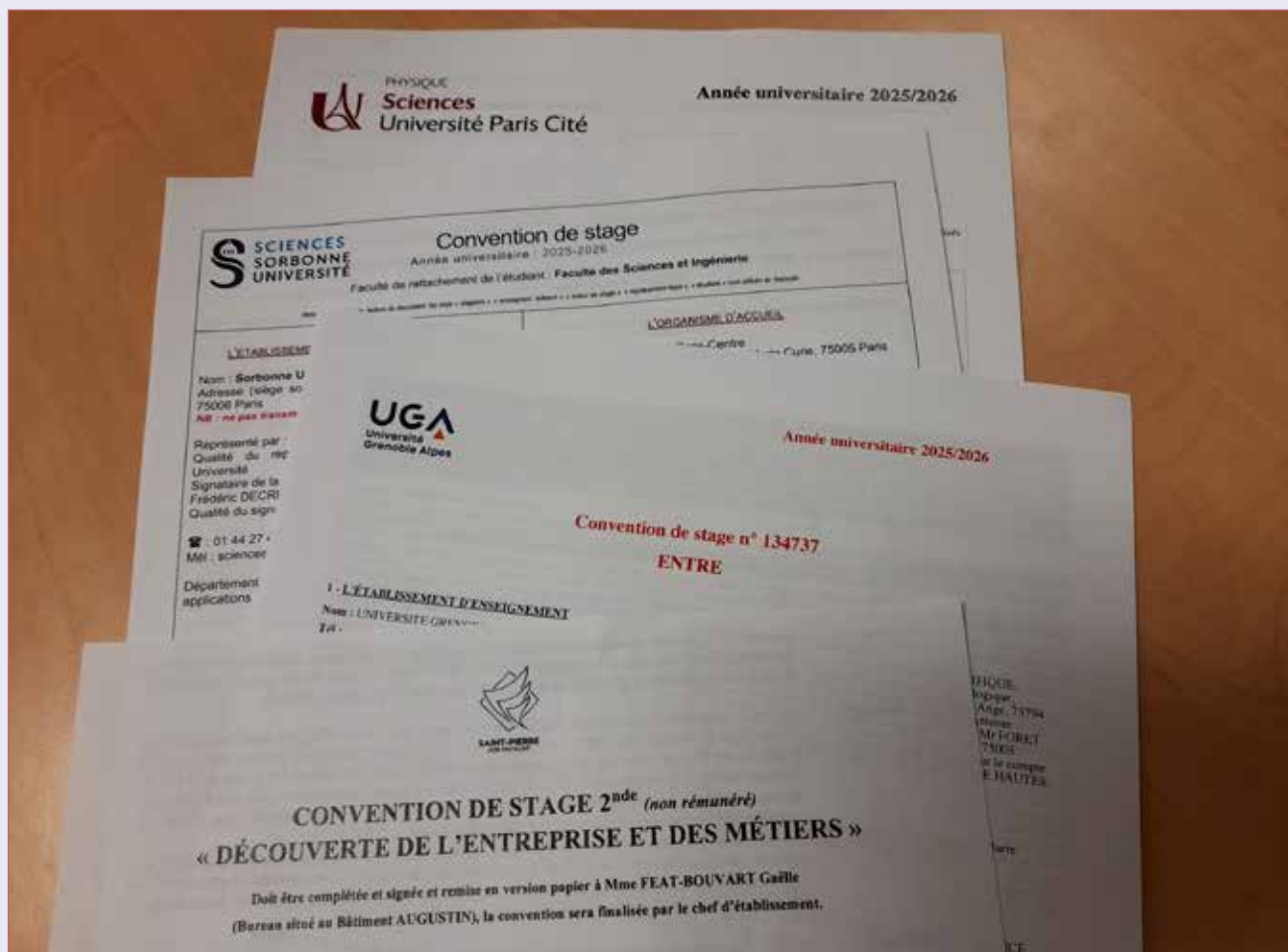
Gestion RH des stagiaires :

Yolande Bonnet, Marjorie Stievenart-Ammour,
Yves-Patrick Tchenbou

CHIFFRES CLEFS

164 stagiaires accueilli.es en 2024-2025.

160 stages commencés en 2024 ou 2025, dont **123** de l'enseignement supérieur.



Vie du laboratoire

RÉUNIONS ET RENCONTRES

- Biennale 2024
- Les vendredi du LPNHE
- Journal Club
- Les séminaires

MISSIONS INTERNES AU LABORATOIRE

- Mission Parité et Diversité
- Comité Développement Durable
- Formation permanente

LE LABORATOIRE AU CŒUR DE LA SOCIÉTÉ

- Valorisation de la recherche
- Partenariats scientifiques
- Fête de la science
- Revalorisation du patrimoine
- Valorisation du patrimoine scientifique du LPNHE
- Science ouverte

INITIATIVES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES PARALLÈLES

- Développement de la muographie au Kenya
- Ikigai, une plateforme d'innovation pédagogique par la ludopédagogie
- Pyvoa



Vie du laboratoire

La vie scientifique du LPNHE s'articule à travers les activités et les projets que nous avons décrits précédemment mais aussi grâce à plusieurs événements incontournables qui ponctuent la semaine.

Les séminaires du lundi permettent de recevoir un collègue d'un autre laboratoire et donnent un large panorama de la recherche contemporaine, dans la discipline et au-delà, comme montré par la liste des ceux qui ont eu lieu ces deux années. Entre autre, les séminaires permettent aux 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 doctorantes et doctorants 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

ou chercheuse et IT à la coordination, permet de mieux prendre en compte les activités techniques. Après avoir connu pendant plusieurs années une baisse de la participation, celle-ci est repartie à la hausse avec 60 personnes en moyenne.

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 2027. La fête de la science et les master-classes sont d'autres moments forts de l'année qui permettent de toucher différents public et de les sensibiliser à nos activités. La participation, toujours de bon niveau, montre l'attachement du public et du personnel du laboratoire à ces initiatives.

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.



Biennale 2024

2024 : une biennale tournée vers l'avenir !



Photo de groupe lors de la biennale 2024.

Cette édition s'est tenue du 28 au 31 mai 2024 à Chambon-sur-Lac, au cœur du Puy-de-Dôme, réunissant une large part des personnels du laboratoire. Ce séminaire « hors les murs » a permis de se retrouver dans le cadre verdoyant de l'Auvergne pour travailler ensemble sur les perspectives scientifiques et techniques du LPNHE.

Le programme de cette année a conservé les éléments qui font le succès de cet événement récurrent tout en y apportant des thématiques renouvelées. Deux sessions de présentation de posters ont favorisé des échanges nourris, offrant à chacun et chacune une vision d'ensemble de la diversité des activités des groupes et services. Deux tables rondes ont été programmées, la première consacrée à la transversalité des métiers techniques, la seconde aux scénarii de réduction des gaz à effets de serre dans le cadre de nos activités scientifiques.



Session poster.

Ces moments de réflexion ont été complétés par une sortie collective à Saint-Nectaire, le mercredi après-midi, pour une visite des fontaines pétrifiantes et des grottes du Cornadore. L'environnement naturel du lac Chambon a offert un cadre propice à la détente et à la cohésion, renforçant ainsi les liens au sein de la communauté scientifique et technique.



Visite des grottes du Cornadore.

L'ensemble des membres du laboratoire est rentré avec une vision partagée des défis futurs et une motivation renouvelée pour les projets à venir !

Comité biennale 2024 :

Isabelle Cossin, Bogdan Malaescu, Jérémy Neveu, Marjorie Stievenart-Ammour, François Toussnel et la direction

Les vendredi du LPNHE

L'une des traditions et spécificités du LPNHE est sa réunion hebdomadaire, qui se tient chaque vendredi matin. À l'image de la biennale, cette rencontre a pour vocation de rassembler l'ensemble du personnel du laboratoire : toutes et tous sont invité·es à y participer, quel que soit leur pôle d'activité (chercheuses ou chercheurs, ITA) ou leur statut (stagiaires, doctorant·es, CDD, titulaires).

Ces réunions permettent de présenter les nouvelles et nouveaux arrivant·es, de partager des informations d'ordre scientifique, administratif, technique ou personnel, et d'échanger directement avec la direction, dans un cadre plus léger et à une fréquence plus élevée qu'un conseil de laboratoire.

Une séance typique débute par un tour d'horizon des nouvelles générales, suivi d'une présentation de 20 à 30 minutes réalisée par un·e membre du laboratoire, portant sur un sujet scientifique, technique ou d'intérêt général.

Le LPNHE couvrant un large spectre de domaines de recherche, ces présentations scientifiques et techniques jouent un rôle essentiel pour tenir informés l'ensemble des collègues des avancées et publications en cours, pour stimuler les échanges transversaux ou encore partager un savoir-faire. Il est également important que les personnels techniques et administratifs soient au fait des activités scientifiques qu'ils et elles soutiennent. Dans cette optique, il est demandé aux orateurs et oratrices de rendre tout ou partie de leur présentation accessible à l'ensemble du personnel.

Les présentations à portée générale offrent aussi l'occasion de faire un point d'étape. Voici quelques exemples non exhaustifs : présentation du bilan carbone du LPNHE par le groupe Développement Durable, présentation du nouveau FabLab, bilan de la Fête de la science, traditionnelle réunion des nouveaux entrants, réunion spéciale de Noël (activités ludiques).



Responsables des vendredi :

Successivement : Aurélien Bailly-Reyre, Matthew Charles, David Martin, Olivier Martineau (en charge fin 2025), Amar Hami (en charge fin 2025)

Journal Club

Le Journal Club est un séminaire du LPNHE, organisé par et pour les stagiaires, doctorant.es et post-doctorant.es. Il n'existe aucune limite concernant le choix des thèmes présentés : qu'il s'agisse de sciences, de littérature, d'histoire, de loisirs ou de tout autre domaine, toutes les contributions sont encouragées et appréciées. Après la présentation, s'ensuit souvent un moment convivial autour de thé, café et biscuits pour poursuivre les discussions. La fréquence du Journal Club dépend des demandes de présentations.

Ces deux dernières années, une dizaine de sessions ont été organisées avec des sujets très variés : présentations d'expériences, introduction à la cosmologie, à Zotero, à la photographie, à la littérature, ainsi que des répétitions d'oraux pour les entretiens de l'école doctorale. La participation était stable (environ 10 à 15 personnes à chaque séance), composée essentiellement de doctorant.es. Les stagiaires et post-doctorant.es sont également invité.es et certain.es participent. L'organisatrice pour la période 2023-2025 quitte le laboratoire, mais plusieurs étudiantes ont déjà manifesté leur intérêt à poursuivre l'organisation.

Responsable du journal club :

Claire Dalmazzone (2023-2025)



Préparation du journal club.

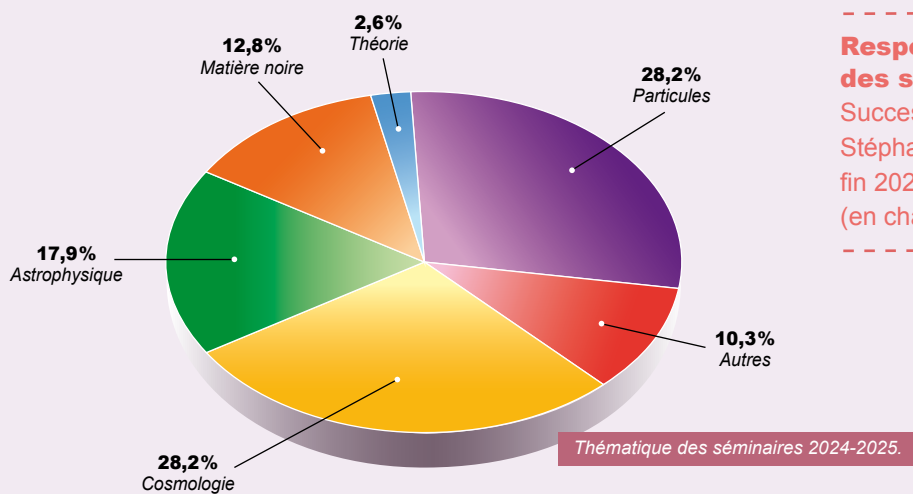


Présentation de l'ancien représentant des doctorants au journal club.

Les séminaires

Le cycle de séminaires du LPNHE, organisé sur un rythme hebdomadaire, a couvert en 2024-2025 un large éventail de thématiques. Les intervenantes et intervenants provenaient à la fois de laboratoires parisiens, d'autres instituts français et d'un grand nombre de structures internationales, traduisant le fort ancrage du laboratoire dans les réseaux de recherche mondiaux. La répartition thématique, illustrée par le graphique ci-dessous, montre une prédominance partagée entre la cosmologie et la physique

des particules (chacune environ 28 % des séminaires), suivies par l'astrophysique (18 %) et la matière noire (13 %). Les présentations plus théoriques et celles classées dans autres thématiques (instrumentation, philosophie des sciences, vulgarisation) complètent l'ensemble. Cette diversité de sujets et de provenances reflète le dynamisme du LPNHE et sa capacité à entretenir un dialogue scientifique ouvert, à la croisée de l'expérimentation, de l'analyse et de la théorie.



Responsables des séminaires :

Successivement : Anna Niemeč, Stéphanie Beauceron (en charge fin 2025), Daniel Kerszberg (en charge fin 2025)

Listes des séminaires

2024

- 15 janvier — Nancy Paul (LKB), « *Fundamental Interactions and Beyond with X-ray Spectroscopy of Exotic Atoms* »
- 22 janvier — Eduardo Simas (Federal University of Bahia), « *Recent Results from the France–Brazil Collaboration in the ATLAS Experiment Framework: Machine Learning for HEP* »
- 29 janvier — Raphaël Granier de Cassagnac (LLR), « *Des particules aux jeux vidéo* »
- 5 février — Stéphane Monteil (LPCA), « *The FCC-ee Project with a Focus on the EW Precision and Flavour Physics Opportunities* »
- 26 février — William Saenz-Arevalo (LPNHE), « *A Novel UCN Detector for Testing Neutron-to-Hidden Neutron Oscillations* »
- 25 mars — Michel Davier (JCLab), « *La confrontation entre le moment magnétique du muon et le Modèle Standard : derniers résultats et perspectives* »
- 28 mars — Anthony Correia & Fotis Giasemis (LPNHE), « *Machine Learning Group Seminar* »
- 22 avril — Marc Moniez (JCLab), « *A Holographic Optical Element to Measure the Transparency of the Atmosphere at the Rubin–LSST Observatory* »
- 29 avril — Michael Doser (CERN), « *Results and Strategies for Measuring the Gravitational Interaction of Antimatter* »
- 6 mai — Christophe Grojean (DESY), « *Future Circular Collider: Physics Case* »
- 13 mai — Eleonora Capocasa (APC), « *Gravitational-Wave Astronomy with Ground-Based Interferometric Detectors: From Birth to the Future* »
- 3 juin — Dimitrii Krasnopetsev (CERN), « *Origin of Cosmic-Ray Electrons and Positrons: Results from the Alpha Magnetic Spectrometer on the ISS* »
- 10 juin — Patrice Verdier (IP2I), « *The Einstein Telescope Project* »
- 17 juin — Pauline Zarrouk (LPNHE), « *DESI* »
- 24 juin — Nicolas Clerc (IRAP), « *Cosmological Constraints from the Abundance of X-Ray Galaxy Clusters* »

- 1^{er} juillet — Anand Raichoor (LBNL), « *Spectroscopic Surveys: DESI, DESI-2, Spec-S5* »
 - 23 septembre — Emanuel Bertrand (ESPCI), « *Alliance interdisciplinaire entre un physicien et une philosophe : débats et controverses autour de la thermodynamique de non-équilibre* »
 - 4 novembre — Afq Anuar (DESY), « *In Search of Top Quark Pairs with Zero Total Angular Momentum* »
 - 18 novembre — Ulisses Barres de Almeida (CBPF), « *The Southern Wide-Field Gamma-Ray Observatory (SWG0)* »
 - 25 novembre — Takis Kontos (LPENS), « *Quantum Sensing of Axion Dark Matter with a Phase-Resolved Haloscope* »
 - 2 décembre — Zaki Leghtas (LPENS), « *Vers l'ordinateur quantique : un qubit de chat de Schrödinger à long temps de vie* »
 - 9 décembre — Axel Arbet-Engels (Max Planck Institute for Physics), « *Unraveling the Particle Dynamics in Active Galactic Nuclei via Multi-Wavelength Photometry and Polarimetry of Bright Blazars* »
 - 16 décembre — Natalie Hogg (LUPM), « *The Weak Lensing of Strong Lensing: A New Probe of Cosmology* »
- ### 2025
- 13 janvier — Silvia Scorza (LPSC), « *TESSERACT: Transition Edge Sensors with Sub-eV Resolution and Cryogenic Targets at the Underground Laboratory of Modane* »
 - 27 janvier — Pauline Zarrouk (LPNHE), « *Galaxy Clustering with DESI: A New Analysis and Its Cosmological Implications* »
 - 3 février — Giacomo Cacciapaglia (LPTHE), « *Black Hole Mergers and Colliders: Two Complementary Windows to New Physics* »
 - 10 février — Tomohiro Inada (CERN), « *Looking Forward to New Physics and Neutrinos with FASER at the LHC* »
 - 10 mars — Ana M. Teixeira (LPCA), « *Flavour Physics: Phenomenological Overview of Quark and Lepton Flavours & Lepton Moments* »

- 17 mars — François Hammer (LIRA), « *The Milky Way Rotation Curve and Its Accretion History from Gaia DR3* »
- 24 mars — Lucas Gréaux (RUB), « *Gamma-Ray Cosmology: Probing the Extragalactic Background Light, Axion-Like Particles, and the Hubble Constant* »
- 7 avril — Antonio Condorelli (APC), « *Current Understanding of the Highest-Energy Particles in Nature* »
- 28 avril — Álvaro Chavarría (University of Washington), « *The Search for Dark Matter with DAMIC-M* »
- 5 mai — Andrea Bocci (CERN), « *Patatrack or: How CMS Learned to Stop Worrying and Love the GPU* »
- 12 mai — Robin Kaiser (Institut de Physique de Nice), « *Intensity Correlations: Imaging and Quantum Optics in Astrophysics* »
- 26 mai — Alex Kim (LBNL), « *Measuring Type Ia Supernova Angular-Diameter Distances with Intensity Interferometry* »
- 16 juin — Tanguy Pierog (KIT), « *EPOS LHC-R: A Global Approach to Solve the Muon Puzzle* »
- 22 septembre — Davide D'Angelo (Università degli Studi di Milano), « *Present and Future of Direct Dark Matter Search with NaI(Tl) Scintillators* »
- 6 octobre — Giovanni Carugno (INFN Padova), « *QUAX: Probing Axion Dark Matter through Quantum Technologies* »
- 13 octobre — Matthias Schott (Physikalisches Institut Bonn), « *Searching for Axions and High-Frequency Gravitational Waves with Table-Top Experiments* »
- 3 novembre — Nikolina Šarčević (Duke University), « *Shear Madness: Taming Systematics in Stage IV Surveys* »
- 24 novembre — Baptiste Ravina (LPTHE), « *Toponium at the LHC: a new frontier in top-quark physics* »
- 1^{er} décembre — Constance Ganot (IP2I), « *Spectroscopic standardisation of the ZTF-SEDm Type Ia supernova sample* »
- 3 décembre — Edwards Shields (Weizmann institute), « *Techniques de super resolution appliquées à la calorimétrie* »

Mission Parité et Diversité

Conformément aux dispositions de la loi de Transformation de la fonction publique du 6 août 2019, le CNRS et les Universités se sont dotés de plans d'action avec pour objectif de remédier concrètement aux inégalités professionnelles entre les hommes et les femmes et de transformer une dynamique collective en actions concrètes dans l'ensemble des unités et structures (source : Lettre de mission des référentes et référents Parité et Diversité des laboratoires émise par la directrice de CNRS Nucléaire et Particules).

Dans les laboratoires, les référentes et référents « Parité et Diversité » font partie de réseaux au sein desquels ils et elles participent à des réunions régulières organisées par le CNRS ou par les universités tutelles.

Elles appartiennent aux réseaux coordonnés par la Mission égalité de Sorbonne Université, par la Vice-Doyenne « Égalité, Diversité, Inclusion » de la Faculté des Sciences de l'Université Paris Cité, par la déléguée scientifique en charge de la parité et de la diversité de l'Institut Nucléaire et Particules du CNRS et par la Correspondante Égalité (COREGAL) de la délégation régionale Paris Centre du CNRS.

Des formations leur sont également proposées, notamment sur la prévention des violences sexuelles et sexistes et des discriminations et sur la réception de témoignages.

Les chargées de mission travaillent avec la direction du laboratoire en intégrant des axes prioritaires définis au niveau national et régional. Ces axes sont :

- être les interlocutrices privilégiées au sein du laboratoire sur les questions de parité et de diversité, en relayant notamment les informations pertinentes,
- contribuer à l'organisation d'actions de sensibilisation et/ou de formation des personnels de l'Institut sur les enjeux liés à l'égalité femmes-hommes et la lutte contre le harcèlement, les discriminations et les violences sexistes et sexuelles,
- être à l'écoute et accompagner les personnels en difficulté en les conseillant et en les orientant vers les dispositifs existants (France Victimes, cellule de signalement du CNRS),
- participer activement aux réunions des réseaux et proposer des actions afin d'œuvrer collectivement au renforcement de la parité, de la diversité et de la lutte contre toutes les formes de discrimination au sein de la structure.

En ce qui concerne le volet prévention de cette mission, des sessions d'information et de sensibilisation sont réalisées annuellement lors de réunion du vendredi du laboratoire. Une page web a été développée en anglais et en français sur le site du laboratoire avec différents documents de références et les indications nécessaires pour faire des signalements auprès des tutelles. 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.

Chargées de mission Parité et Diversité :
Delphine Hardin, Sophie Trincaz-Duvoid

La page web Égalité / Discrimination du laboratoire.

Comité Développement Durable

Le comité de réflexion dédié au développement durable du LPNHE (DD) compte, fin 2025, huit membres représentant les différentes composantes du laboratoire : administration, informatique, enseignement et recherche. Le comité compte deux co-référent-es Développement Durable pour l'IN2P3 et la FSI.

Le LPNHE participe par leur intermédiaire à plusieurs réseaux. Il est notamment impliqué dans le réseau des référent-es volontaires « Enjeux environnementaux » des laboratoires et services de la Faculté des Sciences et Ingénierie (FSI) de Sorbonne Université, coordonné par la vice-doyenne, également membre du LPNHE. Le laboratoire participe également à la Cellule Développement Durable de l'IN2P3, sous la responsabilité du Délégué scientifique Développement Durable, ainsi qu'au réseau des référent-es « Responsabilité environnementale » de la délégation CNRS Paris-Centre (DR02).

Actions menées

Depuis 2019, le comité DD évalue le bilan des émissions de gaz à effet de serre (EGES) associées aux activités du laboratoire et formule des propositions au Conseil de Laboratoire ainsi qu'à l'ensemble du personnel. Dans ce cadre, le groupe DD a proposé l'adoption d'une Charte d'engagement en faveur du développement durable, votée par le Conseil de Laboratoire en janvier 2025. Le comité a également proposé la désignation de référent-es "matériels et achats" par service. Leur mission consiste à accompagner les décisions d'achat dans leur service ou dans le cadre des expériences, afin d'en optimiser l'impact environnemental (choix de fournisseurs vertueux, réemploi, mutualisation, prêt de matériel). Toujours sous l'impulsion du groupe DD, le LPNHE a adhéré en janvier 2025 au réseau Transition-1point5¹, favorisant le partage de bonnes pratiques entre laboratoires engagés dans la réduction de leur empreinte environnementale.

Bilan des émissions de gaz à effet de serre du LPNHE

Les bilans annuels des émissions de gaz à effet de serre (BEGES) associées aux activités du laboratoire, pour la période 2019-2024², sont consultables sur la plateforme nationale Labos-1point5³. Leur évaluation s'appuie sur les données fournies par Sorbonne Université, hébergeur du LPNHE, ainsi que sur les informations transmises par les gestionnaires du laboratoire concernant les achats et les missions. Les BEGES de 2023 et 2024 prennent en compte la consommation énergétique des bâtiments — électricité, chauffage et utilisation de fluides frigorigènes —, les émissions liées aux achats, en distinguant l'achat de matériel informatique, celles associées aux missions, aux trajets domicile-travail, ainsi qu'à l'alimentation. Les EGES hors infrastructures de recherche sont constituées pour moitié par les émissions associées aux achats et pour environ 15 % par celles liées aux missions. À ces contributions s'ajoute la part, largement prédominante, des émissions liées aux infrastructures du CERN⁴, estimées au prorata de l'implication des équipes du LPNHE dans les expériences LHC, ATLAS, LHCb et NA61/SHINE. Les émissions associées aux observatoires astronomiques, terrestres et spatiaux, évaluées par une méthode bibliométrique pondérée par un facteur d'amortissement, représentent moins de 3 % des EGES.

Résultats et perspectives

Le bilan 2024 (voir figures 1a et 1b page suivante) indique une émission moyenne d'environ 16 tonnes équivalent CO₂ (eCO₂) par personne, dont 10 tonnes relèvent de l'empreinte des infrastructures de recherche du CERN. Les émissions liées aux observatoires astronomiques seront intégrées ultérieurement.

...

¹ <https://apps.labos1point5.org/transition-1point5>

² Le BEGES de l'année n est effectué l'année n+1

³ <https://apps.labos1point5.org/ges-1point5>

⁴ <https://hse.cern/fr/rapport-environnement-2021-2022/emissions>

●●● Comité Développement Durable (DD)

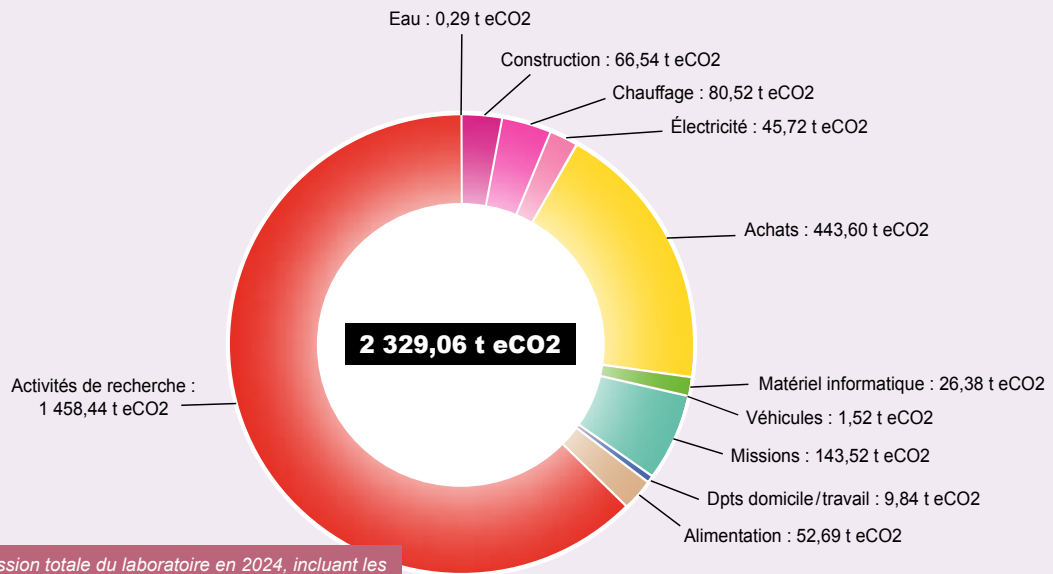


Figure 1a : Émission totale du laboratoire en 2024, incluant les activités de recherche extérieures (essentiellement au CERN).

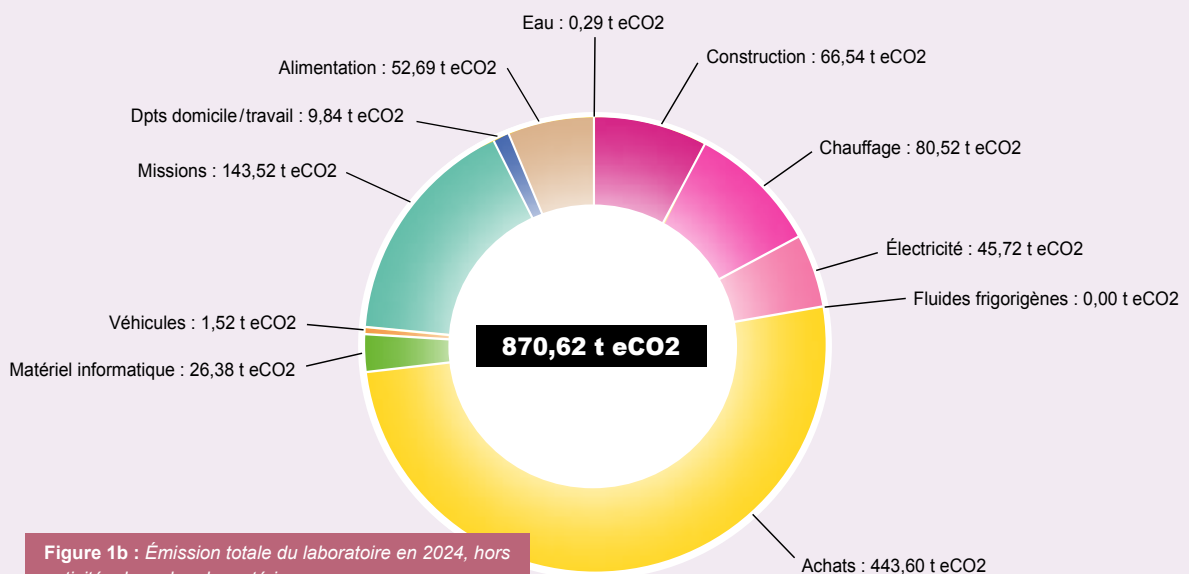


Figure 1b : Émission totale du laboratoire en 2024, hors activités de recherche extérieures.

Ces résultats sont à comparer à l'objectif national de 2 tonnes eCO₂ par personne d'ici 2030 (dont 0,5 tonne pour l'activité professionnelle), qui correspond au maintien du réchauffement climatique mondial en dessous de 2 °C d'ici la fin du siècle par rapport aux niveaux préindustriels.

L'évolution des EGES hors infrastructures de recherche sur la période 2019-2024 (voir figure 2 page suivante) montre une diminution d'environ 2 % par

an, un rythme encore inférieur à l'objectif de réduction d'au moins 10 % par an, fixé en cohérence avec les trajectoires de neutralité carbone.

Membre du comité DD :

Tristan Beau, Mathieu Bernard, Carla, Anaëlle Chalumeau, Guillaume Daubard, Vera De Sa-Varanda, Delphine Hardin, Jean-Philippe Lenain, Michaël Roynel, Alain Vallereau

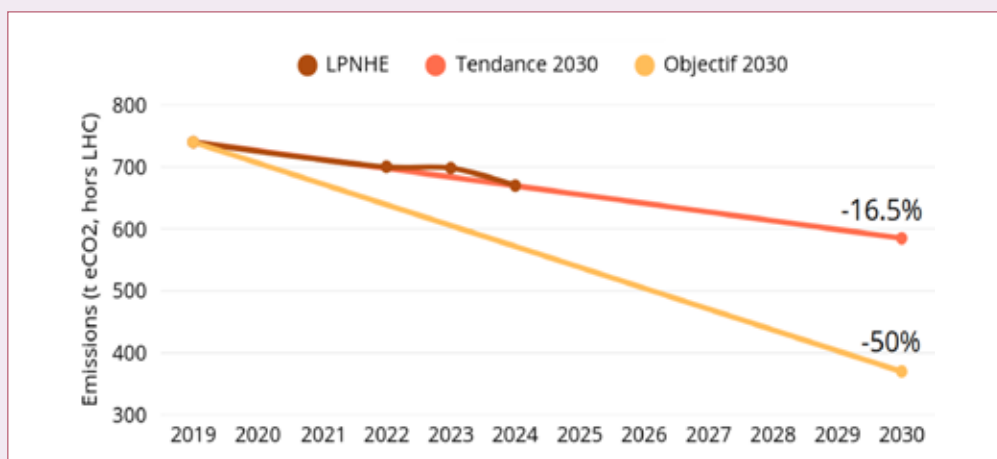


Figure 2 : Évolution des émissions hors infrastructures de recherche de 2019 à 2023 (stage de Louise Aubert, 2025).

Formation permanente

La formation permanente des personnels s'inscrit dans les orientations scientifiques du laboratoire, les évolutions des collaborations existantes et dans les 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 de favoriser le partage de connaissances et d'expériences. D'autres formations sont directement liées à l'acquisition de nouvel équipement ou à des formations spécifiques à certains postes de travail. Le recensement des besoins en formation des services est formalisé chaque année 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 stages de formation ont été réalisés pour un total d'environ 550 jours, presque 50% de plus que sur la période précédente en pleine pandé-

mie. 40 à 45 agents ont suivi une formation chaque année, principalement des personnels ITA ou IATSS, mais aussi quelques chercheuses et chercheurs. Les formations dédiées à l'évolution des métiers sont prépondérantes. Celles concernant la sécurité sont obligatoires et prioritaires pour le laboratoire qui se doit de faire travailler son personnel dans des conditions de sécurité maximale. Dans un souci d'intégration, les personnels étrangers bénéficient d'une formation en langue française dès leur arrivée dans le laboratoire. L'autoformation des agents est importante, notamment grâce au *e-learning* mais est aussi assurée par et pour des personnels du laboratoire particulièrement sur les techniques d'intelligence artificielles. Les étudiants en thèse doivent suivre des formations dans le cadre de leurs écoles doctorales.

Certains membres du LPNHE organisent ou interviennent par ailleurs dans des écoles ou des rencontres : les Écoles IN2P3 "Du Détecteur à la Mesure", "École de Gif", ou bien les "Rencontres de Moriond", "École SIMDET", "IDPASC"...

Chargé de mission formation :
Frédéric Derue

Valorisation de la recherche

Les activités de recherche scientifiques et techniques du LPNHE ont aussi des impacts sociétaux, la stratégie de valorisation du LPNHE s'articule en deux axes.

Un premier axe est la collaboration industrielle : à titre d'exemple, le LPNHE collabore actuellement avec l'entreprise DELL pour le développement d'une approche originale pour l'accélération quantique dans les calculs IA. Le LPNHE a aussi un partenariat avec Tower Semiconductor dans le domaine de la microélectronique.

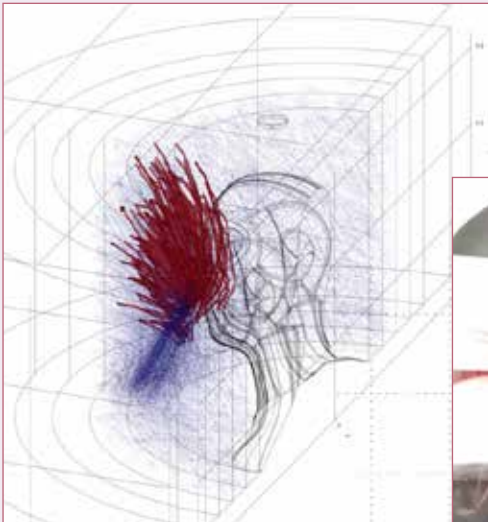
Un deuxième axe est la valorisation directe par l'innovation, le LPNHE a ainsi déposé un brevet en juin 2025 pour une protection respiratoire à filtration active, sans contact avec le visage. Cette innovation est issue de modèles de mécanique des fluides du processus de respiration humaine très précis développés grâce aux outils de calcul du laboratoire. Ce projet est actuellement suivi par le CNRS, Sorbonne Université et la SATT Lutec, en vue de la création

d'une start-up. Ainsi, le projet AirWaiv illustre parfaitement la capacité du LPNHE à transférer ses compétences fondamentales vers des applications sociétales concrètes. Ce projet propose une protection respiratoire active de nouvelle génération, conçue pour pallier les contraintes majeures des masques traditionnels (FFP2, masques à cartouches). Contrairement aux solutions classiques reposant sur l'étanchéité mécanique contre le visage, AirWaiv utilise une barrière de flux d'air dynamique. L'année 2025 a marqué un tournant décisif dans la maturation du projet et dans sa valorisation :

- Reconnaissance et prix : lauréat du programme MyStartUp de Sorbonne Université et soutenu par la SATT Lutec et Lauréat du premier prix Technology Call de l'AID, le projet a franchi les étapes clés de l'étude de marché et du dépôt de brevet.
- Perspectives industrielles : le projet se structure désormais sous forme de start-up pour répondre aux besoins critiques des secteurs de la santé (personnel médical), de l'industrie et du BTP.

Responsable de la valorisation :

Nabil Garroum



Partenariats scientifiques

Les équipes de recherche du laboratoire sont actives au sein 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 toutes les collaborations et partenariats, nous nous limitons à quelques exemples.

Tout d'abord, la quasi-totalité des projets scientifiques du laboratoire sont menés en étroite collaboration avec le CNRS/IN2P3 et ses laboratoires, par un échange très constructif avec leurs équipes scientifiques et techniques. On peut évoquer le changeur de filtre de LSST, qui a été intégré dans nos locaux par une équipe constituée de cinq laboratoires de l'IN2P3, ou encore le cluster parisien avec IJCLab et l'IRFU, qui a en charge la production de 2000 modules ITk pour la jouvence du détecteur ATLAS au CERN.

Historiquement, le laboratoire a mené une bonne partie de ses recherches dans le laboratoire européen CERN à Genève, avec de grandes collaborations internationales représentatives des meilleurs laboratoires mondiaux. Aujourd'hui ce sont ATLAS et LHCb qui portent ce flambeau. Aujourd'hui en phase de préparation, c'est le projet FCC, toujours au CERN, à cheval entre France et Suisse, qui va incarner le futur de la physique des particules.

Un autre axe historique du laboratoire est constitué par nos collaborations avec les collègues aux États-Unis. Cela concerne principalement l'équipe de cosmologie qui collabore au grand projet d'Observatoire Vera Rubin ainsi que le projet DESI. Ces deux projets sont financés et réalisés en grande partie aux États-Unis.

On pourrait aussi évoquer des prestigieuses universités et laboratoires européens (Heidelberg, Milan, Prague, Rome) et mondiaux (Tokyo, Chicago, Melbourne, TRIUMF, LBL Berkeley, IHEP Beijing) avec lequel nous collaborons activement.

Au niveau local, le laboratoire est membre de l'Initiative de la Physique des Infinis (IPI) de l'Alliance Sorbonne Université (2020-2024). Cette initiative se consolidera par l'institut COSMOS, qui devrait ouvrir un espace de dialogue entre sciences de l'Univers et lettres, à partir de 2026. Le porteur fait partie du LPNHE.

Le LPNHE est aussi membre de la Fédération de Recherche des Interactions Fondamentales (FRIF), qui regroupe, sous la tutelle de Sorbonne Université, les chercheurs du LPNHE et les théoriciens du LPTHE, du LPTENS et de l'APC. L'affiliation à la fédération a permis de développer les interactions avec théoriciens et phénoménologues.

Au niveau de la région Île-de-France, le laboratoire est partenaire du groupement de recherche GRIF, « Grille au service de la Recherche en Île de France ». Ce groupement vise à doter les laboratoires franciliens impliqués dans le LHC (IRFU, IJCLAB, 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.

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.

Enfin, le laboratoire est impliqué dans le programme EPLANET d'échanges scientifiques avec l'Amérique latine. Deux membres du laboratoire participent au programme *Latin-American Alliance for Capacity building in Advanced Physics* (LA-CoNGA Physics) qui se poursuit avec El Bongo, 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 et un projet de *capacity building* au Kenya.

Fête de la science

Le LPNHE s'investit dans des actions éducatives et de médiation scientifique à destination du grand public, des étudiants et des élèves. À ce titre, il participe, depuis 1997, à la fête de la science, avec une équipe de plus de 30 personnes.

Un programme conçu à multiples facettes est proposé à chaque édition pour accueillir près de sept cents visiteurs dont la moitié de scolaires. Des visites guidées par un ou une membre du laboratoire permettent aux visiteurs d'appréhender les thématiques de recherche ainsi que les outils et les méthodes utilisées. Des ateliers pédagogiques, à destination des lycéennes et lycéens, abordent la physique ou l'instrumentation sous un aspect plus concret, comme par exemple « La Radioactivité », « Mesure de la masse d'un électron avec un double-décimètre » ou « Les techniques d'impression 3D ». Des conférences grand public présentent les recherches menées au laboratoire en permettant d'approfondir certains sujets, quand un concours « ma thèse en 5mn » a pour objectif de faire découvrir aux lycéennes et lycéens la recherche en physique des hautes énergies, mais aussi de faire se rencontrer les jeunes scientifiques



Lauréat.es du concours « ma thèse en 5mn » en 2025.

et sensibiliser les doctorant.es à la médiation vers le grand public. Depuis 2018, le LPNHE s'inscrit dans la tradition de proposer aux publics un parcours ludique inspiré des *Escape Game*.

Le LPNHE inscrit ses visites dans la participation de Sorbonne Université à cet événement. En particulier, il participe au « Village des Sciences » en animant un stand à destination des étudiantes et étudiants, et du grand public. De plus, grâce à un partenariat avec l'Institut des Nano-Sciences de Paris, des visites de l'accélérateur SAFIR sont organisées chaque année.

Depuis toutes ces années de médiation scientifique, le pôle communication a su motiver et animer de nombreux volontaires en proposant de nouvelles animations, activités, de nouveaux messages, objectifs, enjeux, thèmes.



Stand du LPNHE au Village des Sciences.

Organisation de la fête de la sciences pour le LPNHE :

Isabelle Cossin, Frédéric Derue,
Vera de Sà-Varanda

Revalorisation du patrimoine

Le laboratoire a continué son travail de revalorisation du patrimoine scientifique, notamment autour de la chambre à brouillard, des chambres à bulles. Cette dynamique a permis l'émergence de nouveaux projets :

- Exposition de Kaspar Ravel lors de la restitution de sa deuxième année de résidence art-science à Sorbonne Université : prêt de la chambre à brouillard et médiation au Théâtre de la Ville au printemps 2024.
- Les 70 ans du CERN à la Cité des sciences et de l'industrie à l'automne 2024 : présentation de la chambre à brouillard et d'une sélection de clichés issus de la chambre à bulles.
- Chambre à brouillard et participation au ciné-débat « Peut-on contrôler les nuages ? » à Sorbonne Université durant l'hiver 2024, organisé par la Direction des Relations Science, Culture, Société.
- Les clichés de la chambre à bulles BEBC ont été présentés lors de la Fête de la Science 2025 au Palais de la Découverte. Comme ce dernier est toujours en travaux, la présentation a eu lieu au Grand Palais. Il s'agissait d'un événement très important, car de nombreuses incertitudes subsistent quant à la réouverture du Palais de la Découverte dans l'aile ouest du Grand Palais.



Photos issues de la collection de clichés de chambre à bulles BEBC du LPNHE aux 70 ans de CERN.

Valorisation du patrimoine scientifique du LPNHE

Les chercheuses et chercheurs, et les membres des services techniques, 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.

Ces éléments sont généralement peu ou pas exploités.

Plusieurs projets menés en 2023 ont permis de revaloriser une partie de ce patrimoine.

Clichés de chambres à bulles

À l'issue de l'exposition *Chambre à brouillard*, qui s'est tenue à L'ahah à l'automne 2023 (volet RAPAC 2022-2023), l'artiste Hugo Deverchère a découvert — grâce à deux vidéos réalisées par Nicolas Darrot et Olivier Dadoun — les clichés de chambres à bulles conservés par le laboratoire.

Une collaboration entre Hugo Deverchère et Olivier Dadoun a démarré au milieu de l'année 2024.

Le laboratoire s'est impliqué sur deux détecteurs de chambres à bulles menés au CERN :

- la chambre à bulles de 2 mètres,
- la chambre à bulles BEBC (*Big European Bubble Chamber*).

État des lieux (janvier 2025)

Le laboratoire possède dans ses sous-sols (notons que quelques rouleaux se trouvent probablement encore dans certains bureaux) :

- 11 bandes BEBC : toutes dans de grandes boîtes (5×2, 1×1) — bandes grand format (70 mm), tracés branchés, fond noir ;
- 39 bandes Chambre à bulles 2 m : 10×3 + 1×2 dans de petites boîtes, + 7 sans boîtes — bandes petit format (50 mm), tracés noirs, fond blanc.

On compte un peu moins de 800 clichés de la chambre à bulles de 2 m, d'une longueur de 170 à 174 mm (réf. *2 m User's Handbook*) pour une largeur de 50 mm, soit environ 140 mètres de film.

Numérisation des clichés de chambres à bulles

Un travail de numérisation a été entrepris sur plusieurs clichés de la chambre à bulles BEBC, et de manière systématique sur l'ensemble des clichés issus de la chambre à bulles de 2 mètres.

Pour mener à bien cette tâche, le binôme a développé un banc-titre automatisé spécialement conçu pour la numérisation des films.

Ce dispositif combine plusieurs aspects techniques :

- Mécanique : fabrication par impression 3D des pièces de guidage et des dérouleurs de film ;
- Électronique et automatisation : asservissement des moteurs via un Raspberry Pi, permettant le déplacement précis de la pellicule ;
- Acquisition et traitement d'image : utilisation de la bibliothèque OpenCV pour la détection automatique des motifs (patterns) présents sur les clichés.

Le système reconnaît ainsi chaque cliché, déclenche automatiquement la prise de vue, avance la bande jusqu'au motif suivant, puis s'arrête de nouveau pour reprendre une photo.

Ce processus permet une numérisation rapide, homogène et reproductible de l'ensemble des films conservés, tout en assurant une traçabilité précise des images obtenues.

Ce travail a été réalisé sur 3 bandes, correspondant aux 3 vues différentes que possède la chambre à bulles de 2 m.

Notons que ce travail a été rendu possible grâce à la découverte, dans les sous-sols du laboratoire, d'une pièce (probablement en laiton) servant à maintenir la bande déroulée sur les tables de *scanning* afin d'éviter les effets de parallaxe des traces.

Expositions

- The AfterImage P.T.1
 - Galerie Sator (galerie de l'artiste) — printemps 2025
 - Galerie Dumonteil à Shanghai — automne 2025
- The AfterImage P.T.2
 - Présentée à La Capsule, dans le cadre de la Biennale Nemo d'art numérique de la région Île-de-France.
 - <https://www.biennalenemo.fr/>

Conférence Arts-Science au Collège de France

Présentation des détecteurs visuels en physique des particules lors du colloque Diffractions quantiques : arts et sciences en dialogue, le 15 octobre 2025. Pour plus d'information <https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/colloque/diffractions-quantiques-arts-et-sciences-en-dialogue>

Porteur des projets revalorisation du patrimoine et des projets art-science :
Olivier Dadoun



Exposition à la galerie Sator.



Pièce dénichée dans les réserves du laboratoire appartenant certainement à une table de projection.



Light Box d'un cliché BEBC (format 180x130 cm).



À l'entrée de l'exposition à la Capsule au Bourget.

Science ouverte

La recherche fait aujourd'hui face à un enjeu majeur : préserver, partager et ouvrir les données qu'elle produit, afin de favoriser une science ouverte, transparente et cumulative, utile à la fois aux équipes scientifiques et à l'ensemble de la société. Par définition, la science ouverte désigne la diffusion des résultats, des méthodes et des productions de la recherche. Elle s'appuie sur les opportunités offertes par la transition numérique pour promouvoir l'accès libre aux publications, aux données, aux codes sources et aux protocoles scientifiques. Dans ce contexte, le laboratoire est engagé dans le projet DOP2I – Données Ouvertes pour les Deux Infinis, un projet structurant porté par l'IN2P3. Ses objectifs sont les suivants :

- recenser les actions déjà en cours au sein de l'IN2P3 et de ses collaborations ;
- identifier les besoins encore non couverts et définir les outils et services nécessaires ;

- contribuer à la réflexion sur l'organisation et la structuration de ces activités au sein de l'IN2P3 ;
- définir l'articulation entre les initiatives de l'IN2P3 et celles développées à l'échelle internationale (Europe, EOSC), ainsi qu'avec les orientations du ministère, du CNRS et des universités.

Notons que le projet Pyvoa (voir page 128), 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 les données sont sur Zotero.

Chargé de mission science ouverte :
Olivier Dadoun



Image issue du document du Plan Données de la recherche du CNRS, <https://www.science-ouverte.cnrs.fr/fr/>

Développement de la muographie au Kenya



Un détecteur de muons installé dans la chaîne des Chyulu au Kenya. Le détecteur pointe sur une colline de la chaîne afin d'observer les variations saisonnières de son contenu en eau.

Le LPNHE est impliqué depuis 2023 dans des activités de développement de la muographie au Kenya. Exploitant la production naturelle de muons par interaction des rayons cosmiques avec les atomes de l'atmosphère, la muographie offre la possibilité d'obtenir une image interne de grandes structures, de façon analogue à l'imagerie par rayons X utilisée dans le domaine médical. Non-destructive, cette technologie a fait ses preuves, par exemple en archéologie ou en volcanologie.

Le projet WATCH (*Assessment of WAter resources from muon Tomography in the Chyulu Hills, Kenya*), pour lequel le LPNHE a joué un rôle fondateur, a pour but d'étudier le rôle de la chaîne volcanique des Chyulu, située à environ 250 kilomètres au sud-est de Nairobi, dans la dynamique d'alimentation et d'évacuation de l'eau dans la région. Il s'agit en particulier de comprendre les processus d'alimentation

des sources Mzima, situées à la pointe sud-est de la chaîne, et qui apportent aujourd'hui 30 % des ressources en eau de la ville de Mombasa, la deuxième ville du pays. C'est un projet multidisciplinaire qui ambitionne de combiner la muographie, la gravimétrie, la tomographie par résistivité électrique, les mesures hydrométéorologiques et des enquêtes socio-environnementales.

En décembre 2024, le LPNHE a participé à l'installation d'un télescope à muons construit à l'IP2I, au cœur de la chaîne des Chyulu, puis à sa maintenance sur le terrain tout au long de 2025. Situé dans le parc national de Tsavo Ouest, le détecteur est protégé de la faune sauvage par une structure grillagée. Il est alimenté par des panneaux solaires et batteries et contrôlé à distance grâce à une antenne satellite. Il a été positionné de sorte à viser un des nombreux dômes volcaniques qui constituent la chaîne, et observer les variations saisonnières de son contenu en eau en combinant la muographie et la gravimétrie.



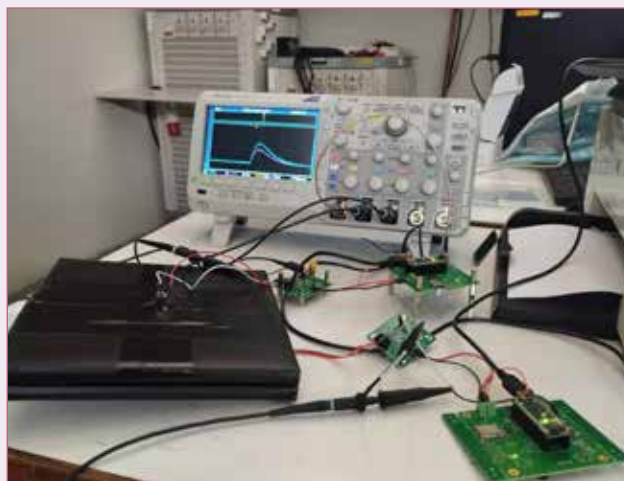
Opération de maintenance de l'alimentation électrique d'un détecteur de muons installé dans la chaîne des Chyulu au Kenya afin d'observer les variations saisonnières de son contenu en eau.

●●● Développement de la muographie au Kenya



Un détecteur de muons installé dans la chaîne des Chyulu au Kenya. Le détecteur est constitué de trois plans de scintillateur plastique afin de reconstruire la trajectoire des muons ayant traversé une colline de la chaîne.

En parallèle, le LPNHE développe un petit compteur de muons à base de scintillateurs plastiques, en partenariat avec l'université de Nairobi (UoN). Ce dispositif a vocation à être utilisé pour des travaux pratiques à la fois à Sorbonne Université et à l'UoN. C'est aussi une première étape vers la construction future d'un détecteur plus complexe permettant de faire véritablement de l'imagerie.



Développement d'un compteur de muons pour l'enseignement à Sorbonne Université et l'université de Nairobi. Dans l'état actuel, deux scintillateurs sont placés l'un sur l'autre. La coïncidence des signaux dans les deux scintillateurs que l'on voit sur l'écran de l'oscilloscope indique le passage d'un muon.

Chercheuses et chercheurs :

Matthew Charles, Mathieu Guigue, Olivier Martineau, Lydia Roos

Équipe technique :

Julien Coridian, Marc Dhellot, Alain Vallerau, Vincent Voisin

Étudiantes et étudiants :

Gitene Tiberius Nyanga'u

Ikigai, une plateforme d'innovation pédagogique par la ludopédagogie

La plateforme [ikigai.games](https://www.ikigai.games) est l'expression d'un projet pédagogique créé par Bertrand Laforge à Sorbonne Université en 2017 et qui est porté depuis 2021 à l'échelle nationale par l'association Games For Citizens qui regroupe une soixantaine d'acteurs de l'éducation (universités, grandes écoles, écoles primaires, cités éducatives), des organismes de recherche, des associations d'éducation populaire, et des organismes publics soucieux de diversifier leur manière d'interagir avec les apprenants dans le cadre

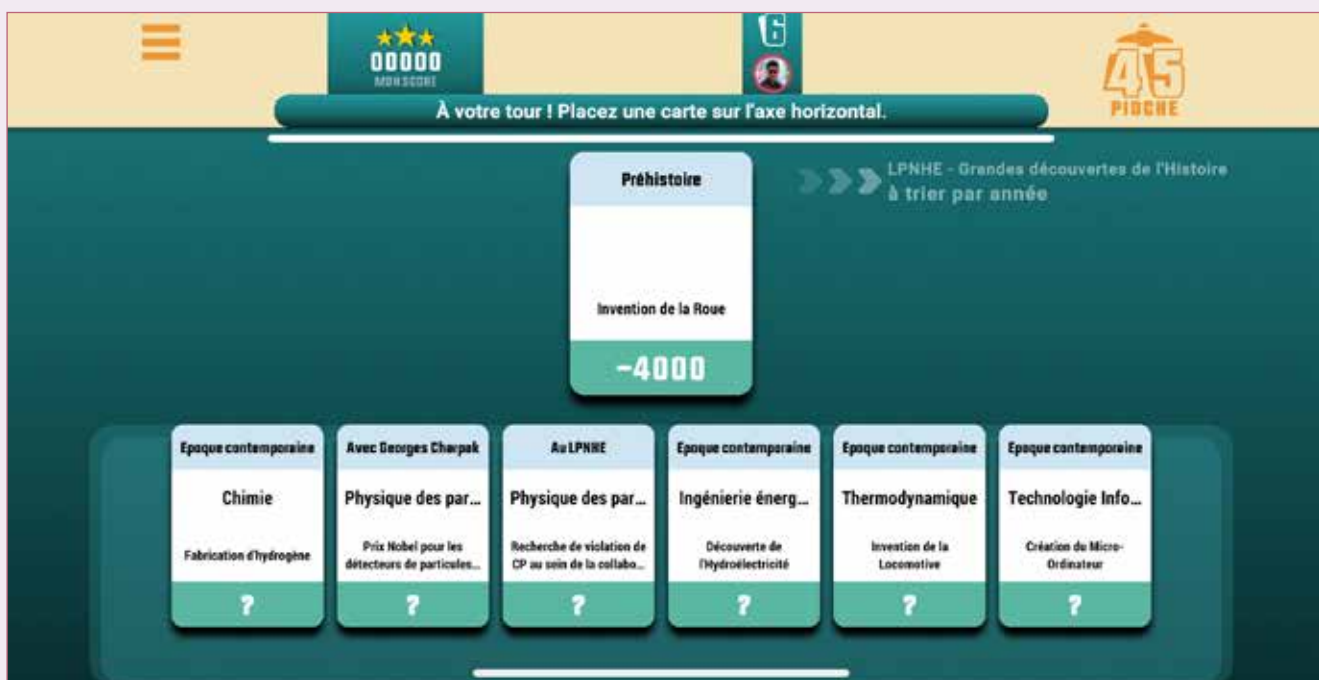
éducatif et le grand public dans le cadre de la médiation culturelle et scientifique. Cette solution répond à différents problèmes majeurs qui gênaient antérieurement le développement et la maintenance d'outils numériques pour l'éducation et la médiation en adoptant une logique de mutualisation des jeux et services développés, en mettant en œuvre un travail interdisciplinaire en amont de tous les développements pour faire travailler de manière collaborative experts de la ludopédagogie et ludomédiation, experts scientifiques et

spécialistes de la programmation vidéoludique et web et en intégrant les développements dans un cycle de production permettant d'automatiser le plus largement possible la recompilation régulière des sources et la mise en ligne des applications éducatives sur le site ikigai.games ou sur les différents stores dédiés aux téléphones mobiles.

Le LPNHE développe depuis quelques années un partenariat privilégié avec l'association dans le but de renforcer le contact entre l'association et le monde de la recherche mais également pour diversifier ses outils de médiation scientifique. Dans ce cadre, les jeux coquilles (Masters'Quiz! et Rank-it) qui permettent aux médiateurs de mettre le contenu mis en jeu à leur

main ont été utilisés dans plusieurs contextes : un grand quiz événementiel mis en jeu lors de l'événement organisé en 2024 à la cité des sciences à l'occasion du 70^{ème} anniversaire du CERN, plusieurs événements internes au laboratoire pour sensibiliser les personnels aux problématiques de la transition écologique et énergétique ou de la lutte contre le sexisme en accompagnement de la politique du laboratoire et des tutelles sur ces sujets.

Chercheur :
Bertrand Laforge



Exemple de partie mettant en jeu du contenu réalisé au LPNHE.

Pyvoa



Depuis 2020, nous développons un outil dédié à la collecte, à l'analyse et à la visualisation des données liées à l'épidémie de Covid-19. L'outil a beaucoup évolué tant au niveau de ses objectifs, de sa conception, qu'également de son nom (CoCoa puis Pycoa puis désormais Pyvoa).

L'outil Pyvoa (Python Virus Open Analysis) est un ensemble de codes Python™, complètement *open source*, qui fournit un accès simple aux bases de données ouvertes sur la Covid19, mais qui peut également se brancher à d'autres données épidémiologiques. Il permet de normaliser le format des données quelle que soit la base utilisée, d'analyser et représenter ces données, par exemple sous forme de séries temporelles, de cartes (voir illustrations pages suivantes), d'histogrammes. Il assure par ailleurs une jointure transparente avec des bases concernant la géolocalisation (gestion des noms de pays ou de régions, possibilité de jointures sur des bases avec des descriptions différentes, création de cartes) ; ces informations de géolocalisation peuvent par ailleurs être utilisées pour d'autres applications en dehors des aspects viraux.

Cet environnement est pensé pour être accessible à des non-spécialistes : des lycéennes et lycéens qui apprennent Python™, des étudiantes et étudiants, des journalistes scientifiques, voire même des chercheuses et chercheurs qui ne sont pas familiers avec l'extraction de données. Des analyses simples peuvent être directement effectuées, et des analyses plus poussées peuvent être produites par les personnes habituées à programmer en Python™.

L'outil est aujourd'hui techniquement abouti : les modules d'importation de données, de traitement, de visualisation interactive et d'archivage fonctionnent de manière robuste, et l'interface a été pensée pour faciliter l'appropriation des données bien au-delà de la simple consultation de graphes. C'est l'aspect archivage sur lequel nous nous consacrons actuellement,

car les bases utilisées, pourtant institutionnelles, ne sont pas pérennes et disparaissent, avec elles, l'ensemble des données publiques sur cette pandémie. L'archivage est désormais assuré par un stockage complet des données sur l'outil Zenodo (<https://zenodo.org/>) soutenu par l'Union Européenne, utilisant les ressources informatiques situées au CERN (voir schéma).

Le projet est soutenu par Université Paris Cité par l'intermédiaire de l'Institut Ad Memoriam (<https://viral-memory-ad-memoriam.u-pariscite.fr/>) auquel le laboratoire est donc associé. Nous avons ainsi pu accueillir ces dernières années 6 stagiaires (licence, master, doctorat) qui ont activement participé au projet. En cette fin 2025, la phase de développement s'achève et nous entrons dans une phase décisive : celle de la diffusion et de l'implantation durable de l'outil dans la communauté impliquée dans la mémoire de la pandémie.

Notons qu'une instance de Pyvoa fonctionne actuellement sur le JupyterHub du laboratoire.

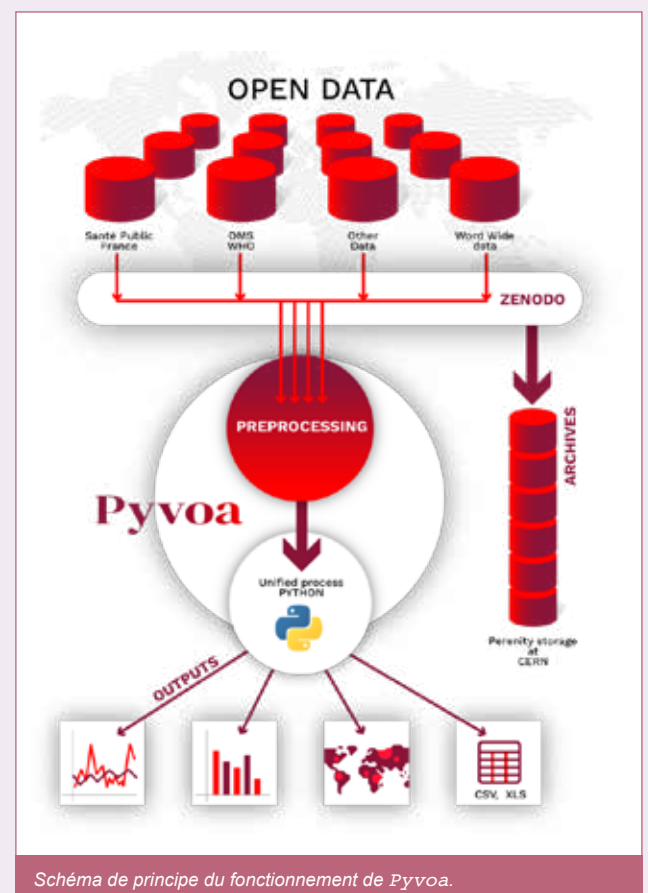


Schéma de principe du fonctionnement de Pyvoa.

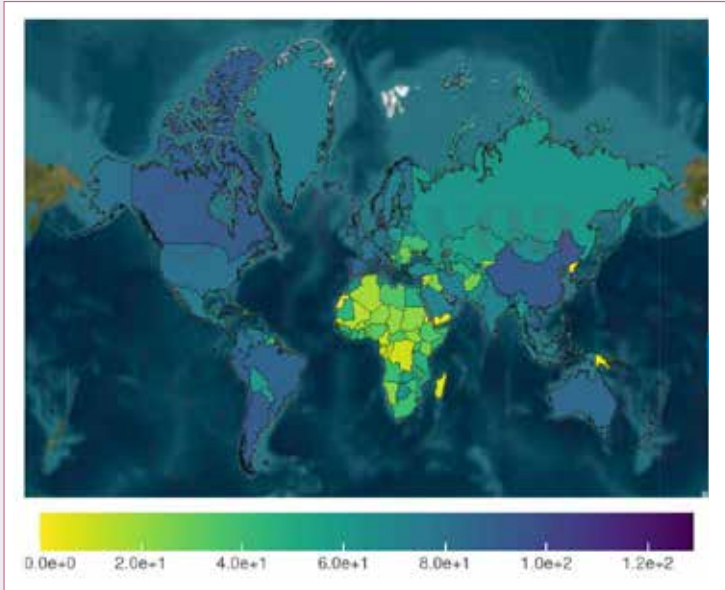


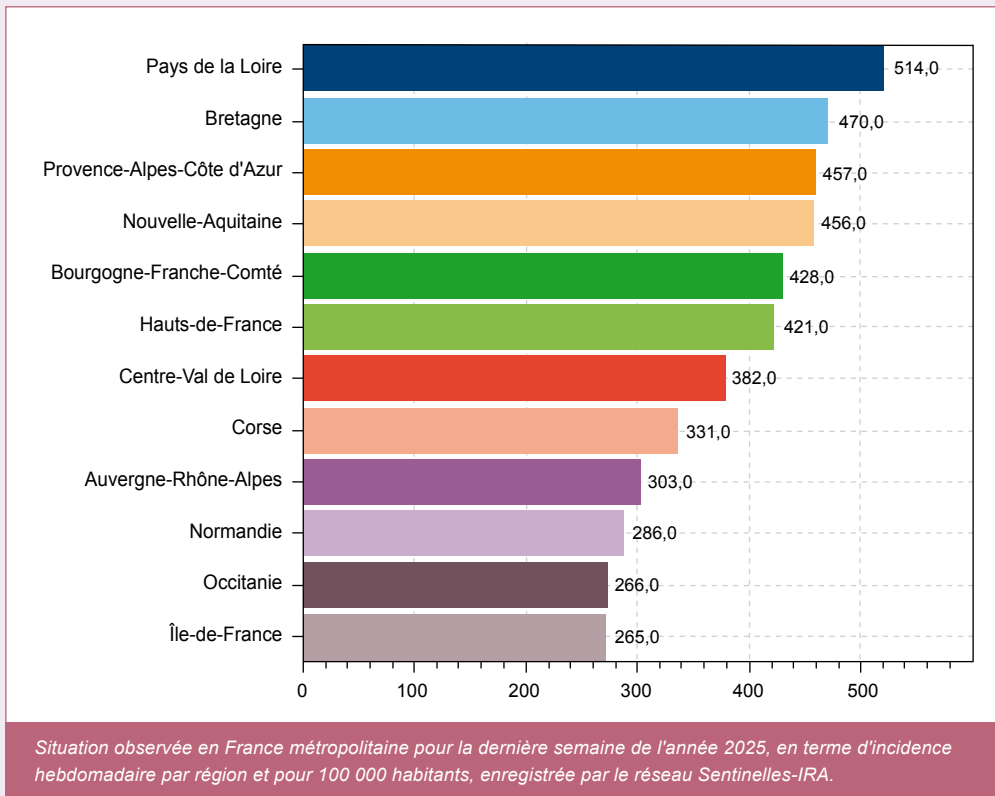
Illustration des capacités de pyvoa en terme de cartographie : taux de vaccination anti-covid (en pourcents de la population) au travers le monde au 31 décembre 2022, sur la base des données de "Our World In Data" (OWID).

Les infections respiratoires aiguës (IRA) se définissent par l'apparition brutale d'une fièvre — ou d'une sensation de fièvre — accompagnée de symptômes respiratoires.

Cette surveillance épidémiologique est menée en collaboration avec Santé publique France et le Centre National de Référence des infections respiratoires. Elle s'appuie sur l'observation de patients présentant une IRA vus par un médecin généraliste ou un pédiatre.

Équipe :

Tristan Beau, Olivier Dadoun,
Julien Browaeys (laboratoire MSC de UPCité)



Situation observée en France métropolitaine pour la dernière semaine de l'année 2025, en terme d'incidence hebdomadaire par région et pour 100 000 habitants, enregistrée par le réseau Sentinelles-IRA.

PUBLICATIONS, COMMUNICATIONS,

PUBLICATIONS

La liste des publications du LPNHE de janvier 2024 à décembre 2025 est disponible sur le site internet du laboratoire à l'adresse :

<https://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?article1830>

COMMUNICATION À DES CONFÉRENCES, SÉMINAIRES, ÉCOLES THÉMATIQUES

Renaud Amalric

- « Measurements of charmless three-body decays », ICHEP 2024, Prague 17-24 juillet 2024

Pierre Astier

- École d'Été de cosmologie Rodolphe Cledassou, Hendaye, août 2024
- École d'Été de cosmologie Rodolphe Cledassou, Montricher-Albanne, août 2025

Bernard Andrieu

- « The XENONnT Dark Matter Experiment: New Physics Searches with Nuclear Recoil Measurements », COSMO 2024, Kyoto, Japon, octobre 2024

Julien Bolmont

- « Highlights/Prospects for searches for QG-induced time delays », et « Focus on source intrinsic effects », Astrophysical searches for quantum-gravity-induced time delays, Trieste, janvier 2024
- « Discriminating between source-intrinsic and Lorentz invariance violation time delays », Theory Meets EXperiments (TMEX 2025), Rencontres du Vietnam, janvier 2025

Simon Bouchard

- « Density-split with the BGS », COLOURS, Institut Pascal, Orsay, juin 2025
- « Density-split with the BGS », Colloque Action Dark Energy, Paris, octobre 2024

Reina Camacho

- « Importancia de las colaboraciones y la diplomacia científica para abordar retos globales, desde retos en física de partículas al cambio climático », Conference on Physics, Astronomy, Climate Change, and Mathematics (CRISCA), Honduras, juin 2024
- « Higgs physics at the LHC », XVth Latin American Symposium on High Energy Physics (SILAFEA), Mexico, Mexique, 4 novembre 2024

Thibaud Carcone

- « Test beam results of ITk pixel sensors for the new ATLAS ITk detector », 16th Pisa Meeting on Advanced Detectors (Pisameet 2024), Ile d'Elbe, Italie, 26 mai 2024

Anaëlle Chalumeau

- « AI and Machine Learning Applications at the Near Detector of the T2K Experiment », EPS-HEP, Marseille, France, juillet 2025

Jean-Marc Colley

- « Cours sur Numpy, Numba, JAX, CuPy », école d'été "Gray Scott School" sur le calcul intensif, 2024 et 2025
- « E-field reconstruction pipeline with polarization », GRAND collaboration meeting, Varsovie, juin 2025

Pablo Correa Camiroaga

- « NUTRIG: Development of a Novel Radio Self-Trigger for GRAND », Arena 2024, Chicago, juin 2024
- « NUTRIG: Development of a Novel Radio Self-Trigger for GRAND », ICRC 2025, Genève, Suisse, juillet 2025

Francesco Crescioli

- « ATLAS ITk Pixel Detector Overview », Deep Inelastic Scattering and Related Subjects (DIS2025), Le Cap, Afrique du Sud, 24-28 mars 2025

Olivier Dadoun

- « Traits physiques », colloque "Diffractions quantiques : arts et sciences en dialogue", Collège de France, Paris, 15 octobre 2025

Claire Dalmazzone

- « Overview of the NA61/SHINE experiment at CERN SPS », 4th J-PARC symposium, Mito, Japon, octobre 2024
- « Measurement of the CP violation in neutrino flavour oscillation with Hyper-Kamiokande », EPS-HEP, Marseille, France, juillet 2025

Line Delagrangé

- « QCD & Lund Jet Plane studies at FCC-ee », Poster (1er prix), 3rd ECFA workshop on e+e- Higgs/EW/Top Factories, Paris, octobre 2024
- « Measurement of multi-jets and boson plus jets production with ATLAS », EPS-HEP2025, Marseille, France, juillet 2025
- « High-precision QCD physics at FCC-ee », EPS-HEP2025, Marseille, juillet 2025

Wilfrid Da Silva

- « COMET Track Finding and Fitting », 16th France-China Particle Physics Network/Laboratory workshop (FCPPN/L 2025), Shandong University (Qingdao), Qingdao, China

Frédéric Derue

- « Status of electroweak parameter measurements (m_W , m_{top} , $\sin^2 \Theta_W$, ...) », QCD@LHC 2024, Fribourg en Brigsau, Allemagne, 7 octobre 2024

Jacques Dumarchez

- « Latest T2K results », ACHEP, Rabat, Maroc, octobre, 2024

Arsène Ferrière

- « Reconstruction of cosmic-ray properties with uncertainty estimation using graph neural networks in GRAND », ICRC 2025, Genève, Suisse, juillet 2025

Tommaso Fulghesu

- « Charged Lepton Flavour Violation searches in B decays at LHCb », ICHEP2024, Prague, 17-24 juillet 2024

Nabil Garroum

- « Cours sur PyTorch », école d'été "Gray Scott School" sur le calcul intensif, 2024 et 2025

Claudio Giganti

- « Near detectors for T2K and Hyper-K », ETH Zurich seminar, mars 2024
- « T2K Results on Neutrino Oscillations », XXXI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Milan, Italy, juin 2024
- « The T2K Near Detector upgrade : first data and next steps towards Hyper-Kamiokande », IPHC seminar, novembre 2024

Frédéric Girard

- « XeLab - A cryogenic platform for the DARWIN Experiment », Fourth DMLab Meeting, Paris, octobre 2024
- « Towards XLZD - Hardware R&D and challenges in scaling up xenon detector », McGill University, Montréal, Canada, janvier 2025

Vladimir Gligorov

- « LHCb Highlights », EPS-HEP 2025, Marseille, France, 7-11 juillet 2025

Guillaume Grolleron

- « Investigating Active Galactic Nuclei variability with the Cherenkov Telescope Array Observatory », 8th Heidelberg International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy, Milan, septembre 2024

Marion Guelfand

- « Reconstruction of inclined cosmic ray properties with GRAND data », ICRC 2025, Genève, Suisse, juillet 2025
- « The Giant Radio Array for Neutrino Detection and its prototype phases », 58ème Rencontres de Moriond - Very High Energy Phenomena in the Universe (VHEPU), La Thuile, mars 2024

Mathieu Guigue

- « Status of the Hyper-Kamiokande far detector and timing system », EPS-HEP, Marseille, France, juillet 2025

Zekun Jia

- « $b \rightarrow s\ell\ell$ Transitions at LHCb », Anomalies and Precision in the Belle II Era - Workshop, Vienne, Autriche, 8-10 septembre 2025

Daniel Kerszberg

- « Cosmology with gamma rays », Astrophysical searches for quantum-gravity-induced time delays, Trieste, janvier 2024
- « Search for Dark Matter annihilation with a combined analysis of dwarf spheroidal galaxies from Fermi-LAT, HAWC, H.E.S.S., MAGIC, and VERITAS », 58ème Rencontres de Moriond - Very High Energy Phenomena in the Universe (VHEPU), La Thuile, mars 2024
- « Non-parametric Template LIV analysis: the case of the 2014 Mrk421 flare », atelier "ASTROVIBE - Astrophysical Studies of Time delays fROm Violation of Lorentz Invariance and Blazar Emission", Paris, juillet 2024
- « Search for Dark Matter annihilation with a combined analysis of dwarf spheroidal galaxies from Fermi-LAT, HAWC, H.E.S.S., MAGIC, and VERITAS », Second International Conference on the Physics of the Two Infinities, Tokyo, novembre 2025

Yahya A. R. Khwaira

- « ITk Pixel System Test of the ATLAS Experiment », TWEPP 2024, Glasgow, Écosse, 30 septembre - 4 octobre 2024

Jean-Philippe Lenain

- « AGN models within CTAO Science Data Challenge », atelier "ASTROVIBE - Astrophysical Studies of Time delays fROm Violation of Lorentz Invariance and Blazar Emission", Paris, juillet 2024
- « The AGN Key Science Project with CTAO », atelier "ASTROVIBE - Astrophysical Studies of Time delays fROm Violation of Lorentz Invariance and Blazar Emission", Paris, juillet 2024
- « Utilisation de GRIF par H.E.S.S./CTAO », atelier "GRIF à 20 ans », Paris, juin 2025

Bogdan Malaescu

- « On the evaluation of the HVP contribution to a_μ and α_{QED} (and implications for the EW fit and α_S) », Rencontres de Physique des Particules (RPP) et Journée des succès de l'UFR de physique de Sorbonne Université, Paris, janvier 2024
- « ISR measurements of hadronic spectra from BaBar and the evaluation of the HVP contribution to a_μ and α_{QED} », Flavor Physics Symposium Celebrating BaBar's 30th Anniversary, mars 2024

RESPONSABILITÉS ET DISTINCTIONS

- « Open discussion on challenges and possible solutions in unfolding », France-Berkeley PHYSTAT Conference on Unfolding, juin 2024
- « New BABAR studies of high-order radiation and the new landscape of data-driven hadronic vacuum polarization predictions of the muon $g-2$ », ICHEP 2024 (Prague, République Tchèque)
- « Dispersive HVP Updates from DHMZ - Sources of the existing tensions among the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ measurements & implications for the dispersive combinations », 7th Plenary Workshop of the Muon $g-2$ Theory Initiative (KEK, Japon), septembre 2024
- « A Focus on Some Unfolding-Related Activities (Transfer Matrix- and Machine Learning-based methods) », AIPHY Workshop, Geneva, octobre 2024
- « Combination and comparison of Tau ρ measurements », Virtual mini workshop on tau decays de la Muon $g-2$ Theory Initiative, novembre 2024
- « Tau Pheno' Analysis », Virtual mini workshop on tau decays de la Muon $g-2$ Theory Initiative, décembre 2024
- « Precision QCD studies, with low-energy hadronic spectra for the HVP contribution to $(g-2)_\mu$ and with jets at the energy frontier with ATLAS », seminar at the Polytechnique School, Federal University of Bahia, Salvador, Brazil, avril 2025
- « On the dispersive approach for the theoretical prediction of the HVP contribution to $(g-2)_\mu$ and the comparison with lattice QCD », KCETA Colloquium, KIT, Germany, mai 2025
- « Dispersive HVP Updates from DHMZ: Comparisons among the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ measurements », 8th Workshop of the Muon $g-2$ Theory Initiative, Orsay, septembre 2025
- « Detailed treatment of uncertainties and correlations for jet energy calibration and cross-section measurements - Why do we need so many uncertainties / nuisance parameters ? », PDF4LHC & PHYSTAT workshop, octobre 2025
- « ATLAS Jet Cross-Section Measurements for PDFs », LHC EW WG General Meeting, novembre 2025

Edoardo Mariani

- « Multibody charmless decays at LHCb », 13th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, Cagliari, Italie, 15-19 septembre 2025

Marco Martini

- « Neutrino-nucleus cross sections for neutrino oscillation experiments: status and challenges », ESNT (CEA) workshop, Gif-sur-Yvette, France, Janvier 2024
- « Meson Exchange Current contributions in semi inclusive leptonucleus scattering », ESNT (CEA) workshop, Gif-sur-Yvette, France, Janvier 2024

Olivier Martineau

- « Status of the GRAND project », ICRC 2025, Genève, Suisse, juillet 2025
- « NUTRIG: prospective for a pure, efficient and scalable trigger for next-generation giant radio arrays », 58^{ème} Rencontres de Moriond - Very High Energy Phenomena in the Universe (VHEPU), La Thuile, mars 2024
- « Radio Detection: Advances, Challenges, and Future Directions », Second International Conference on the Physics of the Two Infinities, Tokyo, novembre 2025

Anastasiiia Mikhno

- « Design and characterization of the Flat-Field Calibration of the NectarCAM Camera », ICRC 2025, Genève, Suisse, juillet 2025

José Ocariz

- « Recent BABAR studies of high-order radiation in $ISR e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \gamma$ and $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \gamma$ events and their implications on data-driven hadronic vacuum polarization pre-

dictions of the muon $g-2$ », 9th International Conference on High Energy Particle and Nuclear Physics in the LHC Era, Valparaíso, 2025

- « From LA-CoNGA physics to EL-BONGÓ physics : An open-science collaboration between Latin America and Europe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 6 septembre 2024
- « From LA-CoNGA to EL-BONGÓ : lessons learned and perspectives for physics and higher education in the Andes and in Central America », LASF4RI for HECAP Symposium, Sao Paulo 2024
- « The ATLAS experiment and the search for new physics at the LHC, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburo, 26 août 2024
- « Professeur invité à "Physics Without Frontiers: Chile", The School of Machine Learning in Physics, Valparaíso 2025

Yongyu Pan

- « Light Dark Matter Detection in XENONnT experiment », 20th Patras Workshop, Tenerife, Spain, septembre 2025

Lata Panwar

- « Lund Jet Plane studies at FCC-ee », 7th FCC Physics Workshop, Annecy, janvier 2024
- « Jet Energy Scale Uncertainty using Single Particle Response », BOOST 2024, Gènes, Italie, 29 juillet-2 août 2024
- « QCD & Lund Jet Plane studies at FCC-ee », Poster (1er prix), 3rd ECFA workshop on e^+e^- Higgs/EW/Top Factories, Paris, octobre 2024
- « QCD & Lund Jet Plane studies at FCC-ee », 2nd FCC Italy & France Workshop, novembre 2024, Venise, Italie

Quentin Pellegrini

- « First results from XENONnT on Solar CEvNS », Fourth DMLab Meeting, Paris, octobre 2024

Ugo Pensec

- « Constraints on Lorentz invariance violation from H.E.S.S. observations of PKS 2155-304 flaring period of July 2006 », Theory Meets Experiments (TMEX 2025), Rencontres du Vietnam, janvier 2025
- « New constraints on Lorentz invariance violations from H.E.S.S. observations of the blazar PKS 2155-304 flaring period of July 2006 », BridgeQG 2025, Paris, juillet 2025
- « Constraint on Lorentz invariance violation: combined limit from a cooperation of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes », TAUP 2025, Xichang, Chine, août 2025

Andres Pinto

- « Precise measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \gamma$ cross section », 8th workshop of the Muon $g-2$ Theory Initiative 2025
- « Precise measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \gamma$ cross section », workshop on "Flavour changing and conserving processes" 2025 (FCCP2025)

Leonard Polat

- « Measurement of hadronic cross sections via initial state radiation at BABAR », 58^{èmes} Rencontres de Moriond - Electroweak Interactions & Unified Theories 2024 La Thuile, Italie, mars 2024
- « Towards a new measurement of hadronic cross sections via ISR at BABAR », Seventh Plenary Workshop of the Muon $g-2$ Theory Initiative, KEK, Tsukuba, Japon, septembre 2024
- « New precise measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \gamma$ cross section with BABAR », Lepton-Photon 2025, Monona Convention Center, Madison (WI), USA, août 2025

- « New precise measurement of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \gamma$ cross section with BABAR », 18th International Workshop on Tau Lepton Physics, Palais du Pharo, Marseille, France, octobre 2025

Mélissa Ridet

- « Labos 1point5, Reducing the environmental footprint of our research activities », DESY FH Sustainability Forum, 6 mai 2024
- « Labos 1point5, Reducing the environmental footprint of our research activities », Belle II Sustainability Meeting, 13 mai 2024
- « Jets measurements with ATLAS », QCD 2024, Montpellier, France, 8 juillet 2024
- « Changing the world of research based on solid measurements, ICHEP 2024, Samuel Calvet, Yann Coadou, Mélissa Ridet, Prague, Rép. Tchèque, 17-24 juillet 2024
- « Changing the world of research based on solid measurements », Sustainable HEP 2024, Samuel Calvet, Yann Coadou, Mélissa Ridet, Prague, Rép. Tchèque, 17-24 juillet 2024

Lavinia Russo

- « Implementation of the Martini-Ericson-Chanfray-Marteau RPA-based (anti)neutrino cross section model in the GENIE neutrino eventgenerator », NuFact2025, Liverpool (UK), septembre 2025

William Saenz-Arevalo

- « The T2K ND280 Detector Upgrade », EPS-HEP, Marseille, France, juillet 2025

Luca Scotto Lavina

- « Status and perspectives of Direct Dark Matter searches », CDM Annual Workshop, Wollongong, Australie, novembre 2024
- « The Relentless Hunt For Dark Matter With The Xenon TPC Technology », University of Adelaide, Adelaide, Australie, novembre 2024

Pauline Zarrouk

- « DESI DR1 Full-Shape », Rencontres de Moriond, La Thuile, mars 2024
- « DESI DR1 Full-Shape », Colloque Action Dark Energy, Paris, octobre 2024
- « DESI DR1 results », Fundamental Cosmology, Séville, octobre 2024
- « DESI DR1 mock challenge », Mock challenge workshop, Donostia, février 2025
- « DESI results », Big Data, Big Questions: The Future of Cosmological Surveys, Munich, mai 2025
- « DESI results », COLOURS, Institut Pascal, Orsay, France, juin 2025
- « Bayesian field-level inference with DESI and ZTF SN Ia », Colloque Action Dark Energy, Montpellier, novembre 2025

Marco Zito

- « Current status of neutrino oscillation physics with neutrinos from accelerators », 43rd International Symposium on Physics in Collision PIC2024, National Centre for Scientific Research "Demokritos", Athènes, Grèce, octobre 2024

ORGANISATION DE CONFÉRENCES ET ÉCOLES THÉMATIQUES

Pierre Astier

- membre du comité scientifique, Moriond Cosmologie, mars 2024

Stéphanie Beauceron

- membre du comité d'organisation, Journées Top-LHC France, LPNHE Paris, avril 2024

- membre du comité scientifique des Journées Upgrade ATLAS France 2024, Clermont-Ferrand, mai 2024
- membre du comité d'organisation local, conférence Top2024, Saint Malo, septembre 2024
- membre du comité d'organisation, Journées Top-LHC France, LPNHE Paris, avril 2025

Julien Bolmont

- membre du comité scientifique d'organisation de la conférence internationale « Fifth annual conference on quantum gravity phenomenology in the multi-messenger era (QGMM24) », Madrid, Espagne, juillet 2024
- membre du comité local d'organisation de l'École de Gif 2024 sur l'astronomie multi-messagers, Paris, septembre 2024
- organisateur de la conférence internationale « Bridging high and low energies in search of quantum gravity - 2025 Cost Action CA23130 First Annual Conference (BridgeQG 2025) », LPNHE, juillet 2025

Anja Butter

- membre du comité d'organisation local, conférence ML4Jets, LPNHE Paris, novembre 2024
- organisatrice du workshop « Unfolding 2024 »
- coordinatrice de l'IRN Terascale, session outils
- membre du comité local d'organisation pour LHCP 2026

Reina Camacho Toro

- membre du comité scientifique, Conférence BOOST 2024, Gènes, Italie, août 2024
- membre du comité d'organisation, Conférence Higgs Hunting, Paris, septembre 2024
- co-organisatrice, Hadronic Calibration Workshop (HCW) 2024 (ATLAS internal), Ottawa, Canada, septembre 2024
- membre du comité d'organisation local, conférence ML4Jets, LPNHE Paris, novembre 2024
- membre du comité d'organisation local, COMETA workshop on EFT in HH and VBS.17-19 mars, 2025. Paris, France
- membre du comité scientifique, Conférence BOOST 2025, Brown University, États-Unis, juillet 2025
- membre du comité scientifique, ATLAS Joint Workshop Exotics-HMBS (Higgs, Multi-Boson and SUSY Searches) groups. Edinburgh, UK, juillet 2025
- membre du comité d'organisation, Conférence Higgs Hunting, Paris, septembre 2025

Guillaume Daubard

- ANF Automatismes, Aussois (73), mai 2025

Frédéric Derue

- membre du comité d'organisation, Journées Top-LHC France, LPNHE Paris, avril 2024
- membre du comité d'organisation local, conférence Top2024, Saint Malo, septembre 2024
- membre du comité d'organisation, Journées Top-LHC France, LPNHE Paris, avril 2025
- membre du comité d'organisation scientifique, Journées Physique ATLAS France PAF2025, Annecy, 26-28 mai 2025

Jacques Dumarchez

- organisateur, 58th Rencontres de Moriond EW, mars, 2024
- organisateur, 58th Rencontres de Moriond VHEPU, mars, 2024
- organisateur, 58th Rencontres de Moriond QCD, avril, 2024
- organisateur, 58th Rencontres de Moriond Cosmology, avril, 2024
- organisateur, 35th Rencontres de Blois Particle Physics and Cosmology, octobre, 2024
- organisateur, 29th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS), Juillet, 2024
- organisateur, 59th Rencontres de Moriond EW, mars, 2025

- organisateur, 59th Rencontres de Moriond QCD, mars, 2025
- organisateur, 59th Rencontres de Moriond Gravitation, mars, 2025
- organisateur, 21st Rencontres du Vietnam Cosmology, août, 2025
- membre du comité d'organisation, 21st Rencontres du Vietnam 100 Years of Quantum Physics, octobre, 2025

Vladimir Gligorov

- membre du comité d'organisation, « Connecting the Dots » (séances régulières)
- membre du advisory committee, série d'ateliers ML4Jets (séances régulières) et CHEP

Claire Juramy

- membre du comité d'organisation scientifique de la conférence « Imaging Sensors for Precision Astronomy » en mars 2024 à SLAC

Daniel Kerszberg

- cours « Telescope Camera », Seconde édition de l'école CTAO, La Palma, Espagne, juin 2025

Bertrand Laforge

- membre du comité d'organisation local, conférence ML4Jets, LPNHE Paris, novembre 2024

Jean-Philippe Lenain

- tuteur pour les sessions pratiques avec gammapy, école Cherenkov Astronomy Data School (CADS), Observatoire de Paris, Paris-Meudon, octobre 2024

Bogdan Malaescu

- co-organisateur Muon g-2 Theory Initiative Spring 2024 meeting, avril 2024
- membre du comité d'organisation, Moriond QCD, avril 2024
- co-organisateur de "France-Berkeley PHYSTAT Conference on Unfolding", juin 2024
- membre du comité d'organisation local, conférence ML4Jets, LPNHE Paris, novembre 2024
- co-organisateur de la journée de la FRIF, décembre 2024
- membre du comité d'organisation, Moriond QCD, avril 2025
- co-organisateur du « Eighth Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative », Orsay, septembre 2025
- co-organisateur de 5th FCC / DRD France Workshop, Paris, novembre 2025

David Martin

- organisation d'une formation de 3 jours à l'IJCLab en septembre 2025 : Créer votre processeur RISC-V pour les solutions AMD FPGA et SoC

Marco Martini

- membre du comité scientifique de la conférence internationale NuFact

Olivier Martineau

- membre du comité d'organisation de la conférence VHEPU – Moriond

Éric Pierre

- organisation d'une formation de 2 jours au LPNHE en septembre 2025 : « Routage des circuits hautes vitesses »

Francesco Polci

- secrétaire scientifique et membre du comité d'organisation locale de LHCP2026
- coordinateur "Standard Model" pour les Rencontres de Noirmoutier 2026

Lydia Roos

- membre du comité d'organisation du workshop Exploring Water and Energy Challenges in Kenya : A Call for Collaborative Research Between Kenya and France, 6-8 octobre 2025, Mtito Andei, Kenya.
- co-directrice, East-African School for Young Researchers on Advanced Machine Learning Techniques (EASY-ML), juillet 2025, University of Nairobi, Kenya
- co-directrice, School of Computational Techniques for Physics Students in Kenya (SCoTeP-K), juin 2024

Mélissa Ridet

- membre du comité d'organisation de la conférence « Enseigner les Transitions Écologiques et Sociales dans le Supérieur »
- membre du comité d'organisation du colloque national Labos 1point5

Patricia Warin-Charpentier

- membre du comité d'organisation des 15e Journées Informatique IN2P3/IRFU, 23-26 septembre 2024, Saint-Nicolas-La-Chapelle (73)

Pauline Zarrouk

- membre du comité d'organisation de la réunion annuelle de collaboration DESI, Marseille, juillet 2024
- membre du comité d'organisation de l'action nationale Dark Energy, 2021-2024
- membre du comité d'organisation de l'école d'été Les Houches, juillet 2025

COMMUNICATION POUR LE GRAND PUBLIC

Pierre Antilogus

- France Culture « La Science, CQFD », 4 avril 2024
- BFM Business Tech and Co le Grand du Numérique 11 avril 2024
- campagne de communication sur le départ de la plus grande caméra au monde pour le Chili, avril 2024
- France Info Le journal de 8h 14 mai 2024
- « Journal 18/20 » France Inter, 23 juin 2025
- campagne de communication suite aux premières images de l'observatoire V.Rubin, juin 2025
- émission de vulgarisation scientifique Scope Les incroyables images du telescope V.Rubin <https://www.youtube.com/watch?v=WtQuCc9IQF8>, 2 juillet 2025
- « La Matinale de France Info » / « La Matinale de France 2 » + rediffusion sur TV5 Monde France Belgique Suisse Monaco, 24 juin 2025

Stéphanie Beauceron

- organisation des MasterClass CMS, mars 2025
- « Les Mystères de l'Univers, Introduction à la Physique des Particules », conférence grand public lors de la conférence Top2024, Saint Malo, 26 septembre 2024

Sébastien Bongard

- « Les enjeux énergétiques du XXIème siècle », Lycée Lalande Bourg en Bresse, 24 juin 2025

Simon Bouchard

- « DESI High », programme d'outreach de DESI

Matthew Charles

- organisation des MasterClass LHCB, mars 2024
- organisation des MasterClass LHCB, mars 2025

Olivier Dadoun

- présentation et discussion autour de la chambre à brouillard du laboratoire dans le cadre de l'exposition de l'artiste Kaspar Ravel, en résidence Art/Science à Sorbonne Université (mai 2024) au Théâtre de la ville
- ciné-débat : « Peut-on contrôler les nuages ? », organisé dans l'auditorium de Sorbonne Université (novembre 2024)

- présentation et discussion autour de la chambre à brouillard du laboratoire dans le cadre de COSI (Café Ouvert Sciences et Ingénierie), organisée pour la Journée internationale des nuages avec l'écrivain Mathieu Simonet (mars 2025)

Antoine Letessier-Selvon

- auteur de « Marcel Lulu & la matière noire » publié par CNRS éditions en janvier 2025
- principal intervenant dans l'article « Sous une montagne de Savoie, la chasse aux particules de « matière noire », ce monde parallèle qui structure l'Univers » publié par Le Monde en juillet 2025

Bogdan Malaescu

- CERN Courier, « Do muons wobble faster than expected ? », avril 2025
- "Breve" in letter of IN2P3, juillet 2025

José Ocariz

- « El CERN, la Inteligencia Artificial y el futuro de la física de partículas », Museo interactivo de ciencia y tecnología Maloka, Bogotá, 2025

Francesco Polci

- exposition photographique itinérante grand public liée à notre discipline dans le cadre du GDR-InF (<http://gdrintensityfrontier.in2p3.fr/ExpoPhoto/>), EPS HEP 2025, Marseille

Mélissa Ridel

- membre du conseil scientifique de l'exposition « Galilée et la géolocalisation par satellite », La passerelle, Campus Pierre et Marie Curie, Sorbonne Université en partenariat avec l'ambassade d'Italie à Paris, juin 2024

Pauline Zarrouk

- membre du comité scientifique et intervenant au Festival d'astronomie de Fleurance, août 2024
- membre du comité scientifique et intervenante au Festival Atmosphères, Courbevoie, octobre 2024 et 2025
- festival d'astronomie de Fleurance, août 2024
- « Sonder l'énergie noire en cartographiant les structures de l'univers avec DESI », Société d'Astronomie de Nantes, mars 2025
- « Sonder l'énergie noire en cartographiant les structures de l'univers avec DESI », Festival d'astronomie de Juvisy, novembre 2025
- « Qui appuie sur la pédale d'accélérateur de l'expansion de l'Univers ? », Sorbonne Université, décembre 2025

RESPONSABILITÉS OU MANDATS ÉLECTIFS DANS LES INSTANCES UNIVERSITAIRES OU DE RECHERCHE

Christophe Balland

- élu au Conseil de Département de Licence de SU, 2022-
- co-directeur de l'Initiative Physique des Infinités de l'Alliance Sorbonne Université, 2020-2025
- responsable pour SU de la convention du Double Diplôme de Master entre l'Université de Pise et Sorbonne Université (parcours Interactions fondamentales)
- membre de la commission HDR de l'UFR de Physique de SU, 2024-
- chargé du suivi de la politique de recherche de la faculté des Sciences et Ingénierie, Sorbonne Université 2024-
- membre élu du CNU section 34, 2023-
- vice-président du jury de l'Agrégation Spéciale de Sciences Physiques, option Physique
- délégué Scientifique « Sites et laboratoires » auprès de la direction du CNRS IN2P3, 2023-

Tristan Beau

- membre ex officio du conseil des enseignements de l'UFR de physique à l'UPCité, 2021-2025
- membre du Conseil des BIATSS de l'UFR de Physique de UPCité, 2025-
- élu au conseil de la faculté (CFA) des sciences de UPCité, 2023-

- élu au sénat académique (SA) de UPCité, membre du sénat académique en formation restreinte (SAFR) rang B, 2023-
- membre de la commission formation du sénat académique de UPCité, 2023-2025
- responsable de l'agrégation interne physique chimie (AIPC) de l'UPCité

Stéphanie Beauceron

- membre du bureau de la SFP, 2023-

Julien Bolmont

- membre élu du conseil de l'UFR de physique de Sorbonne Université, 2022-
- membre de la commission RIPEC pour l'UFR de physique de SU, 2024-2025
- co-responsable du parcours de M2 NPAC, 2023-
- directeur adjoint de l'École Doctorale STEP'UP, 2022-
- membre élu du CNU, section 29, 2019-
- membre du bureau et coordinateur de l'attribution des bourses du réseau européen COST "BridgeQG", 2024-

Anja Butter

- coordinatrice général du réseau MSCA AIPHY
- coordinatrice IML coté théorie

Giovanni Calderini

- coordinateur des instituts IN2P3 pour ITk

Reina Camacho Toro

- membre de l'instance Latin American Strategy Forum for Research Infrastructure (LASF4RI), groupe préparatoire, 2019-
- PI française sur l'axe de recherche « Particle physics at large, including theory » pour IRL (International Research Laboratory, CNRS/IN2P3) Particle Physics and Cosmology à Chicago, 2024-

Carla Carvalhais

- formatrice GESLAB pour la DR

Isabelle Cossin

- responsable de l'animation du réseau des communicants de l'IN2P3
- membre du groupe de travail pour la mise en place du réseau Com'on des Chargés de Communication de l'organisme.
- experte auprès de l'observatoire des métiers pour modifier la fiche emploi-type

Guillaume Daubard

- membre expert de commission régionale d'interclassement DR2 CNRS, 2024
- membre du groupe de travail "Guide de démarrage de l'Ingénierie Système", depuis 2024

Frédéric Derue

- responsable du projet GRIF, de grille de calcul au LPNHE, 2005-
- membre du conseil de direction du projet LCG-France, 2009-
- chargé de mission pour projets européens avec l'IN2P3 au LPNHE, 2017-

Romain Gaior

- membre du conseil GDR DUPhy, 2020-

Mathieu Guigue

- membre du conseil de l'UFR de Physique de Sorbonne Université, 2022-
- membre du conseil scientifique de l'UFR de Physique de Sorbonne Université, depuis 2024-
- membre élu de la section 04 du Comité National de la Recherche Scientifique, depuis 2025-

Delphine Hardin

- co-responsable du parcours de Master 2 "Noyaux, Particules, Astroparticules Cosmologie" (NPAC) pour SU, 2012-2025
- co-responsable Double diplôme de Master SU-Univ. Pise, parcours "Interactions Fondamentales et Physique de l'Univers", 2022-2025
- co-référente Egalité et Discriminations de l'UFR, 2025-
- représentante A pour la section 29 au groupe d'experts de l'UFR de Physique, 2015-
- référente IN2P3 Enjeux Environnementaux pour le LPNHE, 2023-
- référente IN2P3 Égalité et Discriminations pour le LPNHE 2025-
- membre du conseil Scientifique LPSC (Grenoble) : 2022-

Bertrand Laforge

- coordinateur de la physique en L1 et responsable de la plateforme de physique expérimentale en L1 à l'UFR de physique de SU, 2019-
- responsable de la formation des doctorants chargés de mission d'enseignement de l'UFR de physique de SU
- membre du conseil du Département du Cycle d'Intégration (DCI) à SU, 2017-
- membre de la commission des thèses et HDR à SU
- chargé de mission pour les liens avec le réseau International Doctorate Network in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology (IDPASC), représentant de Sorbonne Université et des établissements français dans ce réseau et responsable de l'animation nationale de ce réseau, 2019-
- président de l'association Games For Citizens (plateforme Ikgai), 2020-2024
- coordinateur du réseau européen IDPASC (<https://idpasc.lip.pt/>), 2022
- membre du bureau de la SFP, 2022-
- membre du bureau de la division Champs et Particules, 2025-
- membre de la section 01 du comité national CNRS, 2021-2025

Alexandre Lantheaume

- membre du groupe de travail RDM-FA depuis 2022
- trésorier du CLAS Jussieu, depuis 2022

Didier Laporte

- membre du conseil scientifique de l'UFR de physique, 2022-2026
- membre du comité de pilotage d'Atrium, 2014-
- membre élu du conseil scientifique de l'IN2P3, 2024-2028
- membre expert de commission régionale d'interclassement DR04 CNRS, 2025
- membre du COPIL de l'ANF cotation ISO, 09/2024

François Legrand

- GSH (Gestionnaire des Services Hébergés) du LPNHE pour le CNRS

Bogdan Malaescu

- représentant du LPNHE à la FRIF, 2021-
- referee for Swiss National Science Foundation

Olivier Martineau

- co-coordinateur du conseil scientifique du DIM Origines

Évelyne Méphane

- présidente fondatrice et membre du comité de pilotage du CREDAU, réseau des administrateurs de la DR02
- membre du Groupe de travail sur la formation nationale des Administrateurs initiée par la DRH du CNRS
- experte auprès de l'Observatoire des Métiers pour la lecture des profils de concours BAP J

Irena Nikolic

- membre du CENS de l'UFR de Physique de UPCité, 2021-
- membre du conseil de l'école doctorale STEP'UP, 2019-07/2024
- responsable des formations de l'école doctorale STEP'UP pour la composante « Physique de l'Univers », de sept 2019 à août 2025
- co-responsable du M2 NPAC pour UPCité, 2023-

José Ocariz

- membre élu du Conseil Scientifique de l'UFR de physique UPCité, 2021-
- directeur adjoint de EL-BONGÓ physics 2025-
- membre de l'instance Latin American Strategy Forum for Research Infrastructure (LASF4RI), High-Level Strategy Group, juin 2020-

Éric Pierre

- membre du COPIL du réseau PCB-Design de l'IN2P3

Mélissa Ridet

- membre du conseil de l'école doctorale STEP'UP, 2019-2024
- membre du Conseil de l'École Doctorale PHENICS de l'Université Paris-Saclay, 2013-
- membre élue de la commission de la recherche du conseil académique de Sorbonne Université, 2025-
- vice doyenne enjeux environnementaux de la faculté des sciences et ingénierie, -2025
- membre de la direction du GDR Labos1point5, 2022-

Luca Scotto Lavina

- PI pour l'axe Cosmology and Dark Matter de l'IRL PPC CNRS-UChicago
- membre du conseil GDR DUPhy, depuis 2020

Sophie Trincaz-Duvoird

- responsable de la commission des personnels enseignants (COPENS) de l'UFR de physique de SU, 2019-2021 et 2022-
- membre élue au conseil d'UFR de physique de SU, 2019-2021 et 2022-
- membre élue au conseil de département du Master de Physique de SU, 2022-
- chargée de mission égalité - discriminations pour l'UFR de Physique de SU, 2022-2025
- responsable de la spécialité Master 2 Noyaux Particules Astroparticules Cosmologie (NPAC), 2018-
- directrice adjointe du Master de Physique et Application de Sorbonne Université 2024-
- chargée de suivi de la politique de recherche de la FSI de SU pour la physique, 2022-2024
- membre du conseil de l'ED Pheniics 2023-
- membre du comité de pilotage de l'Initiative Physique des Infinis (IPI) de l'Alliance SU et correspondante Mobilité au sein de l'IPI, 2020-2024

Pascal Vincent

- responsable de la spécialité de master "Capteurs, Instrumentation et Mesures" (CIMES) de SU
- membre du bureau de l'école doctorale "Physique en Ile-de-France" (PIF) de SU

Patricia Warin-Charpentier

- CSSI : correspondante Sécurité Système d'Information
- référente laboratoire pour le réseau IN2P3 TEAMLAB
- représentante LPNHE au sein du CCRI : comité de coordination du Réseau des informaticiens de l'IN2P3 et de l'IRFU
- membre du bureau et référente budget au sein de RESINFO : Fédération des réseaux métiers d'Administrateurs Systèmes et Réseaux dans l'Enseignement et la Recherche

- représentante CNRS au sein du Groupe national Logiciel du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Pauline Zarrouk

- membre de l'Action Thématique de Cosmologie et Galaxies (ATCG), 2025-

RESPONSABILITÉS NATIONALES OU INTERNATIONALES AU SEIN DE COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES

Stéphanie Beauceron

- part production manager pour la partie Pixel pour ATLAS : gestion de la logistique pour la construction d'ITk pour l'ensemble des clusters 2024-

Eli Ben-Haim

- coordinateur sénior du groupe BnoC / Event Selection de LHCb, 2017-2025
- coordinateur du groupe Rare decays de la collaboration HFLAV, 2013-

Giovanni Calderini

- responsable du groupe ATLAS-Itk France, 2016-, membre du comité des instituts ITk
- membre de l'Institute Board « Pixels » de la collaboration ATLAS, 2018-
- coordinateur de l'Hybridization, membre du groupe de travail spécialisé sur le Yield et membre du groupe de travail spécialisé sur le stress des bumps d'ITk

Reina Camacho Toro

- co-responsable du groupe de travail « performances Jet-Etmis » de la collaboration ATLAS, 2021-2024
- co-responsable du groupe de physique « Higgs, Multi-boson and SUSY searches » de la collaboration ATLAS, 2024-2026

Artur Cordeiro Oudot Choi

- coordinateur du groupe de recherche de la désintégration LL-ALP en diphoton

Pablo Correa Camiroaga

- représentant des Jeunes Chercheurs au comité de pilotage de la collaboration GRAND
- responsable de la vulgarisation dans la collaboration GRAND

Francesco Crescioli

- membre du coordination board du FastTracker (FTK) comme responsable AMChip de la collaboration ATLAS, 2019-

Frédéric Derue

- chair et représentant du LPNHE du groupe de travail « Calcul ATLAS France », 2017-
- représentant du LPNHE dans le groupe de travail « Physique ATLAS France », 2025-
- responsable des sites web ATLAS-LPNHE et ATLAS-France, 2003-
- représentant ATLAS-IN2P3 à l'International Computing Board de la collaboration ATLAS, 2019-
- coordinateur de l'analyse « mesure de la masse du quark top avec un J/ψ dans l'état final » de la collaboration ATLAS, 2017-

Tommaso Fulghesu

- deputy Migration Coordinator du groupe Rare Decays de LHCb 2022-2024

Claudio Giganti

- membre du comité exécutif de l'expérience T2K, depuis 2021
- responsable national pour l'expérience T2K, depuis 2021

Vladimir Gligorov

- deputy Technical Coordinator LHCb, 2024

Mathieu Guigue

- co-responsable du groupe de simulation et reconstruction de ND280 pour l'expérience T2K, 2019-2023
- co-responsable du groupe du logiciel de l'expérience T2K/ND280, depuis 2024
- responsable de la distribution du calcul pour l'expérience HK, depuis 2022

Daniel Kerszberg

- responsable du groupe de travail « Camera Control & Monitoring » dans la collaboration CTAO-NectarCAM, 2025-
- responsable du groupe de travail « Camera Control » dans la collaboration CTAO-LST, 2023-
- responsable du groupe de travail Analysis Software dans la collaboration CTAO-NectarCAM, -2025

Didier Lacour

- coordinateur HGTD detector units de la collaboration ATLAS, 2016-
- membre de l'Institute Board de HGTD de la collaboration ATLAS
- membre de l'Institute Board de la Collaboration DRD6 - DRD Calo, 2025-

Bertrand Laforge

- co-responsable de l'organisation du groupe Data Quality Calo-Combined (jets, missing Et, egamma, tau, cluster monitoring), co-organisation des shifts associés pendant la prise de données, 2017-
- responsable du développement du logiciel ey / Data Quality et de l'organisation des shifts de Data Quality ey, 2014-

Didier Laporte

- HGTD Support Unit Coordinator depuis 2024

François Legrand

- chair du "data management comitee" et suppléant au board de l'expérience GRAND

Jean-Philippe Lenain

- responsable du groupe de travail Analysis Software dans la collaboration CTAO-NectarCAM, 2025-
- responsable du groupe de travail Data Management dans la collaboration CTAO-NectarCAM, 2025-

Bogdan Malaescu

- co-responsable du Comité de Statistique ATLAS, 2020-
- contact entre le groupe Modèle Standard et le groupe de statistique dans la collaboration ATLAS, 2011-
- co-éditeur des recommandations pour l'unfolding de la collaboration ATLAS,
- représentant dans le « Steering group » du projet HERAFitter de la collaboration ATLAS, 2012-
- coordinateur du sous-groupe "Data-driven HVP" de la "Muon g-2 Theory Initiative", 2023-2025

Marco Martini

- membre du comité de NuSTEC (Neutrino Scattering Theory Experiment Collaboration)

Olivier Martineau

- co-porte-parole du projet GRAND

Jean-Luc Meunier

- coordinateur Front End Electronics de CTAO-NectarCAM, 2023-
- coordinateur Front End Board de CTAO-NectarCAM, 2020-

Irena Nikolic

- représentante du LPNHE au LAR Group Rep de la collaboration ATLAS, 2013-

- membre du Speaker's committee du groupe HGTD de la collaboration ATLAS, 2022-2024
- membre du Speaker's committee de la collaboration ATLAS 2024-

José Ocariz

- responsable de la production de MC sur la grille pour les analyses et les études de performances pour e/y, 2012-

Yongyu Pan

- coordinatrice du groupe d'analyse S2-only (matière noire légère) de XENON, 2024-

Francesco Polci

- operations coordinator de LHCb, 2022-2024

Boris Popov

- coordinateur d'analyse pour la physique des neutrinos dans l'expérience NA61/SHINE au CERN, 2009-
- coordinateur des ressources dans le cadre de l'expérience NA61/SHINE au CERN, 2022-2025
- responsable national pour l'expérience NA61/SHINE, 2018-

Edmar Purcino de Souza

- responsable du groupe Trigger e/y d'ATLAS, 2023-2024

Lydia Roos

- contact des analyses « Low/high-mass $\gamma\gamma$ resonances » de la collaboration ATLAS, 2018-

Luca Scotto Lavina

- responsable national de XENON pour l'IN2P3, 2023-
- coordinateur du groupe de travail Computing de XENON, 2011-
- coordinateur du groupe de travail Xenon Storage and Recovery System de XENON, 2012-
- coordinateur du groupe de travail Computing de DARWIN, 2023-
- coordinateur du WBS L2 Computing de XLZD, 2025-
- membre de l'Editorial Board de XENON, 2022-2024
- membre du DARWIN Executive Board, 2024-
- membre du XLZD Country Representative Board, 2025-
- responsable scientifique R&T XeLab de l'IN2P3, 2020-

François Toussanel

- responsable technique national de CTAO pour l'IN2P3, 2018-
- project manager de CTAO-NectarCAM, 2023-

Patricia Warin-Charpentier

- missionnée par la direction de l'IN2P3 pour l'accès aux ressources disques et puissance de calcul à tous les utilisateurs au niveau international des expériences COMET et g-2

Pauline Zarrouk

- co-responsable de l'analyse-clé Full-Shape DESI DR1, octobre 2020-décembre 2024

PORTAGE OU CO-PORTAGE DE PROJETS NATIONAUX OU EUROPÉENS

Marc Betoule

- responsable scientifique projet ANR SCInf, octobre 2025 - mars 2029

Anja Butter

- responsable scientifique AIPHY, octobre 2024 - septembre 2028
- co-responsable du Master project DataMATTER

Giovanni Calderini

- président du comité de gouvernance du projet Européen AIDAInnova, 2021-2025

Reina Camacho Toro

- responsable scientifique projet ANR « DiHiggs dans les événements VBF : Exploration des propriétés du boson de Higgs avec la production de HH par fusion de bosons vecteurs » DIVE, octobre 2022 - mars 2027
- coordinatrice adjointe de LA-CoNGA, projet européen de type ERASMUS+CBHE porté par l'UPCité, janvier 2019 - janvier 2024

Wilfrid Da Silva

- responsable scientifique projet Européen Marie Skłodowska Curie PROBES, mars 2022 - février 2026

Claudio Giganti

- responsable scientifique projet ANR « Incertitudes systématiques dans les combinaisons de résultats d'oscillations de neutrinos » SUNCORE, octobre 2019 - mars 2024
- responsable scientifique projet ANR « Physique des neutrinos de haute précision pour la mesure de la violation de CP : de T2K à Hyper-Kamiokande » nuOscT2HK, décembre 2024 - décembre 2027

Vladimir Gligorov

- responsable scientifique projet ANR ANN4EUROPE, octobre 2021 - décembre 2025
- co-coordonateur machine learning / AI work package dans ITN SMARTHEP, 2021 - 2025
- responsable IN2P3 dans le projet INFRA-TECH ODISSEE, 2025-2027

Mathieu Guigue

- responsable scientifique projet ANR « Améliorer la précision en temps pour Hyper-Kamiokande » BERTHA, octobre 2021 - novembre 2026

Laurent Le Guillou

- responsable scientifique projet ANR « Calibration Atmosphérique pour Rubin-LSST » CARL, octobre 2023 - septembre 2027

Bertrand Laforge

- coordinateur pour le LPNHE du projet ANR « Recherche de la matière noire avec des particules au long temps de vie au LHC » DMwithLLP@LHC, 2022-2026
- coordinateur du projet IKIGAI (play@SU) de développement d'une plateforme participative de jeux vidéo éducatifs pour le supérieur, 2017-

Antoine Letessier-Selvon

- responsable scientifique projet ANR « Exploitation de l'Instrument DAMIC-M à Modane » EDIM, octobre 2024 - septembre 2028
- responsable scientifique projet Européen Marie Skłodowska Curie ODIM, octobre 2025 - septembre 2027

Bogdan Malaescu

- responsable scientifique projet ANR « The Lund Jet Plane for Precision Physics » LEAP-physics, mars 2022 - janvier 2026
- responsable scientifique projet ANR « Hadronic vacuum polarization and the search for new physics » HVP-4NewPhys, octobre 2022 - décembre 2026
- co-responsable et représentant LPNHE pour le projet Européen ERC ZEPTOMETRY, octobre 2024 - septembre 2029

Olivier Martineau

- responsable scientifique projet ANR « Méthodes innovantes pour une radio-détection autonome, efficace, de haute pureté et duplicable des neutrinos et rayons cosmiques de haute énergie » NUTRIG, octobre 2021 - octobre 2026
- co-porteur du projet Européen ERC Synergy 2025 « Hybrid Elevated Radio Observatory for Neutrinos » HERON

José Ocariz

- coordinateur national du second projet COFECUB (2024-2027) soutenant cette recherche
- porteur de SEMA-ML au sein du CAPES-COFECUB de coopération binationale avec le Brésil, 2024-
- coordinateur international de LA-CoNGA physics, projet européen de type ERASMUS+CBHE porté par UPCité, -2024

Paolo Privitera

- responsable scientifique projet Européen ERC DAMIC-M, septembre 2018 - décembre 2025

Nicolas Regnault

- responsable scientifique projet ANR « Construire l'échantillon de supernovae proches de référence pour la cosmologie avec le ZTF-II Survey » ZTF, octobre 2021 - décembre 2026

Luca Scotto Lavina

- responsable scientifique projet ANR « Technologie Xenon-Argon pour la physique des astroparticules et les applications médicales » X-ART, octobre 2022 - décembre 2026

DISTINCTIONS

Isabelle Cossin

- chevalière dans l'ordre des palmes académiques 2025

Lucile Mellet

- 2024 FJPPN Young Investigator Award for the contribution "to the development of the time generation system for the Hyper-Kamiokande experiment within the FJPPN NU_09 project"

Vladimir Gligorov

- médaille d'argent CNRS 2025

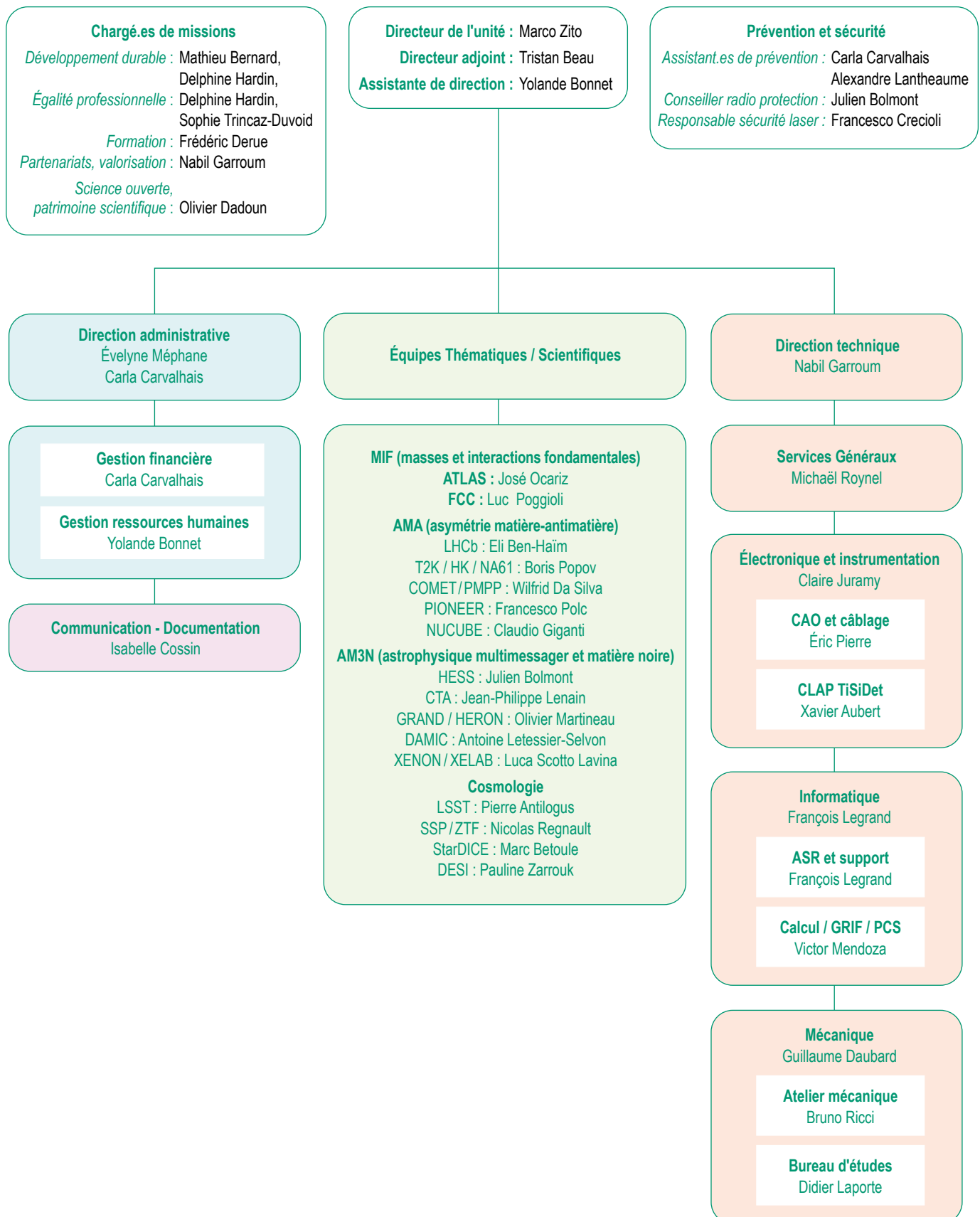
Membres de la collaboration ATLAS

- « Breakthrough Prize » 2025

Membres de la collaboration LHCb

- « Breakthrough Prize » 2025

Organigramme



Membres du laboratoire au 31 décembre 2025

Chercheuses et chercheurs CNRS

Directrices et directeurs de recherche

ANTILOGUS Pierre
 ASTIER Pierre
 CALDERINI Giovanni
 DERUE Frédéric
 GLIGOROV Vladimir
 LACOUR Didier
 LETESSIER-SELVON Antoine
 POPOV Boris
 REGNAULT Nicolas
 ROOS Lydia
 SCOTTO LAVINA Luca
 ZITO Marco (CEA)

Chargées et chargés de recherche

ANDRIEU Bernard
 BEAUCERON Stéphanie
 BETOULE Marc
 BONGARD Sébastien
 BUTTER Anja
 CAMACHO TORO Reina
 DEL BUONO Luigi
 GIGANTI Claudio
 KERSZBERG Daniel
 LENAIN Jean-Philippe
 MALAESCU Bogdan
 POLCI Francesco
 ZARROUK Pauline

Enseignantes-chercheuses et enseignants chercheurs (EC)

Professeures et professeurs

BALLAND Christophe (SU)
 BEN-HAÏM Eli (SU)
 HARDIN Delphine (SU)
 JOYCE Michael (SU)
 LAFORGE Bertrand (SU)
 OCARIZ José (UPCité)
 RIDEL Mélissa (SU)
 TRINCAZ-DUVOID Sophie (SU)
 VINCENT Pascal (SU)

Maîtres et maîtresses 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)
 MARTINI Marco (accueilli sur convention)
 NIKOLIC Irena (UPCité)
 SELEM Luka (UPCité)
 XING Yajing (SU)

Émérites et bénévoles

BARRELET Étienne
 BILLOIR Pierre

BLONDEL Alain
 CHAUVEAU Jacques
 DUMARCHEZ Jacques
 KRASNY Mieczyslaw
 LOISEAU Benoît
 PAIN Reynald
 PONS Yvette
 VANNUCCI François

Ingénieures, ingénieurs, techniciennes et techniciens

Ingénieures et ingénieurs de recherche

AUBERT Xavier
 BERNARD Mathieu
 COLLEY Jean-Marc
 CRESCIOLI Francesco
 DADOUN Olivier
 DAUBARD Guillaume
 DEGRET Gabriel
 GAÏOR Romain
 GARROUM Nabil
 JURAMY-GILLES Claire
 LAPORTE Didier
 LEGRAND François
 MARTIN David
 MENDOZA Victor
 MEPHANE Évelyne
 MEUNIER Jean-Luc
 RUSSO Stefano
 SEPULVEDA Eduardo
 TOUSSENEL François
 WARIN-CHARPENTIER Patricia

Ingénieures et ingénieurs d'étude

BONNET Yolande
 CORONA Pascal
 FREROT Fabien
 LANTHEAUME Alexandre
 MERCERON COSSIN Isabelle
 PIERRE Eric
 TERRONT Diego
 VALLEREAU Alain
 VOISIN Vincent

Assistantes ingénieures et assistants ingénieurs

CARVALHAIS Carla
 COLINOT Sébastien
 DHELLOT Marc
 GEORGET Charlotte
 MALBRANQUE Philippe
 ORAIN Yann
 RICCI Bruno
 RIVIERRE Jean-Pascal
 ROYNEL Michael
 STIEVENART-AMMOUR Marjorie
 TCHUENBOU Irène
 TCHUENBOU Yves-Patrick

Techniciennes et techniciens de recherche

BASSAVA Swarnalatha
 CORIDIAN Julien

Autres (CDI)

DE SÀ-VARANDA Véra

CDD

BOGATYREV Nikita
 BOÏAN Aurélie
 DIAZ LOPEZ Gonzalo
 GOULET Cyrille
 HAMI Amar
 HILY Evan
 SABIA Maria Adriana
 SYLLA Adama

Chercheuses et chercheurs CDD, postdocs

AVALOS Nicolas
 CORREA CAMIROAGA Pablo
 DE DOMINICIS Claudia
 FERLEWICZ Daniel
 GUELFAND Marion
 JIA Zekun
 KHWAIRA Yahya
 PINTO Andres
 POLAT Léonard
 ZHU Yuwei

Étudiantes et étudiants

Doctorantes et doctorants

AMEZZA Thiziri
 BOUCHARD Simon
 CAILLET Alois
 CAMPOMAGNANI Andrea
 CAZZOLA Veronica
 CHALUMEAU Anaëlle
 CORREIA Anthony
 DEJEAN Frédéric
 FARIS Yassine
 FERRIÈRE Arsène
 GACINO OLMEDO Alejandro
 ITURRIZA RAMIREZ Joaquin
 LEBAS Nathan
 LUMENGO-KIDIMBU Harrys
 MARIANI Edoardo
 MENDOZA GRANADA Diego
 MIKHNO Anastasiia
 OSMAN AHMED EMAM Mahmoud
 PAN Yongyu
 PÉNÉLAUD Chloé
 PITZ Sebastian
 RESTREPO Lorenzo
 ROTH William
 RUSSO Lavinia

Apprenties et apprentis

CHOUBAÏ Iman

Stagiaires accueilli.es au laboratoire sur la période 2024-2025

ABECASSIS Joël	DAVID PEYRONNET Tom	KHRUL Oleksandra	RESTREPO Lorenzo
ABRASSART Nino	DEGARDIN Solène	KOULOGLI Djamal	REY LE GUERN Max
AGARWAL Paridhi	DEJEAN Frédéric	KOVI Adjévi	RICHARD Danis
AHMED Mulan	DE MIRANDA RIMES Sarita	KOVTUSHENKO Aleksia	RIVET Eliott
ALBINET Justin	DIAMANKA Aissatou	KVAMME Emil Bark	RIVIERE Aymeric
AMELINE Antonin	DIOP Khady	LACOUTURE Lucas	ROBIN Victor
ANTONOVA Anna	DJIALA NGNITEDEM Marc-Isamaël	LAINE Isaac	RODICHEVA Sofia
APICELLA Emilio	DONG Wenhao	LAOUICHI-SAADI Solal	RODRIGUEZ Adam
ARAB Nazim-Arab	DUMAS Eliott	LAUNAY Camille	ROSCELLI Alice
AUBERT Louise	DUPIERRE Antoine	LEBAS Nathan	ROSSI Mélodie
BANU Lucas	EL HIDAOUI Ayat	LE GALL Lucas	ROTH William
BARRAUD Rémi	FAUCHER Chloé	LE GOFF Antoine	ROUSSELOT Amshuman
BAUER Baptiste	FEJZA Elisa	LE LIEVRE Valentin	SANTACRUZ Mario
BAYLE Nino	FERNANDES DE CASTRO SILVA Rita	LE NOAN Ambre	SAURIER Anatole
BEAU-ROUSSEAU Gaëtan	FOURNIER Tom	LETURCQ-DALIGAUX Mattéo	SCHMITT Sidney
BELILITA Amir	FRUCHARD Achille	LOISEAU Luc	SENTILHES Arthur
BENARBIA Enora	GABORIT Lola	LUMENGO-KIDIMBU Harrys	SHINE Guilad
BENSALEM Célia	GARROUM Nour	MARTINEZ MENDEZ Alexander	SIEFERT Paul
BENSMAILI Ines	GENESTE Pierre	MARTIN Gabriel	SIMOES Lucas
BERNARD Hugo	GEORGET Héloïse	MCCALLIN Liliane	SOSALE VASUDEVA Bhuvan
BIREE Maxence	GERIN Mattéo	MEJAN Emilie	TAN Germain
BOISSEAU Paul	GIBEILI Anne-Gabrielle	MENDOZA GRANADA Diego	TELLO Adrian
BONGARD Tao	GILLES Daniel	MIKHNO Anastasiia	TéNA Maxime
BOUCHARD Simon	GILLES-LORDET Antoine	MORTAZA Diana	TERNISIEN Thomas
BOULZE Noam	GILOUPE Valentin	MOUSSA Tanina	THAI Flavie
BOURDEAU Samuel	GUO Jordan	NAJIH Sofia	TIAN Xishui
BRIAND Matisse	HAAS Julian	NARDY Emilie	TIMMERMANS Anne
CALÌ Giorgia	HEEDER Ewan	NIZAK-LEGRAND Lucien	TRAMIER Gaspard
CAMPOMAGNANI Andrea	HEMERY Julia	NYANG'AU Gitene	TRUONG Gia Bao
CAREW Benjamin	HOUARD Quentin	OZENC Duygou	TU Diêu Xuân
CARSEL SARRAN Camille	HOU Ludovic	PALHINHAS Lisa	UDRISTE Rares-George
CAZZOLA Veronica	HUANG Yunyi	PALLARD Neeve	UNG Alexandre
CHAILLET Augustin	ISLAM Shahinul	PARDO Mathis	VASQUEZ RATTI Adrian
CHAKRABORTTY Anushka	JAIME HINOSTROZA Piero	PENELAUD Chloé	VIENNE DUCREZ Alyssia
CHARBONNEAU Baptiste	JEEVABALAN Piranavan	PIERRE DE BORVILLE Léonard	VIOLLEAU Alexandre
CHEN Tony	JENSEN Yanis	PLANCON Jean-Baptiste	VOLKOV Aleksandr
CLODION Thibault	JESSENNE Martin	POISVERT Pierre	VORA Nishchay
CORET-GONCALVES Jonas	JOHNSON Enea	POUCHET Pierre	WILLOZ Eva
CRUZ DE ABREU FARIAS Théo	JOLY Tristan	QUELIN Mathias	WINTERSTEIN Christopher
DADOUN-ANFOSSO Daphné	JOSEPH Guillem	RAGOT Gauthier	ZAIDAN CORDERO Zoe
D'ARRIGO Lorenzo	JUIGNE Leslie	RAUX Ethan	ZAKI Daniel

Instances du laboratoire

Jusqu'à février 2025

Conseil de laboratoire

Président ex-officio

ZITO Marco

Membres ex-officio

Tristan Beau
Rémi Cornat
Guillaume Daubard
Évelyne Méphane

Représentant.e des étudiant.es

Ugo Pensec

Membres élu.es

Mathieu Guigue
Claire Juramy
François Legrand
Jean-Luc Meunier
Delphine Hardin
Julien Bolmont
Jean-Philippe Lenain

Membres nommé.es

Carla Carvalhais
Nicolas Regnault

Conseil Scientifique

Membres extérieur.es nommé.es

Christophe Yeche (SPP)
Guillaume Unal (CERN)

Membres nommé.es

Pierre Astier (président)
Delphine Hardin
Stefano Russo

Membres élu.es

Matthew Charles
Claudio Giganti (secrétaire)
Didier Laporte
Jean-Philippe Lenain
Eduardo Sepulveda
Sophie Trincas-Duvoid

Membres ex-officio

Tristan Beau
Rémi Cornat
Guillaume Daubard
Marco Zito

Comité Local Hygiène et Sécurité et Conditions de Travail

Président

Marco Zito

Membres ex-officio

Tristan Beau
Rémi Cornat
Guillaume Daubard
Évelyne Méphane

Assistant.es de prévention

Carla Carvalhais
Alexandre Lantheaume

Conseiller RadioProtection

Julien Bolmont

Représentant.es du personnel

Claire Gilles-Juramy
Jean-Philippe Lenain

Ingénieure Prévention Sécurité Patrimoine du CNRS-Paris Centre

Isabelle Fanget

Cheffe de service de Prévention des Risques Professionnels

Conseillère de Prévention (Campus P.-et-M.-Curie)
Sarah Chimbault

Responsable du Département

Transverse de Prévention des Risques Professionnels de l'Université de Paris
Yann Coutard

Ingénieur en Radioprotection, IN2P3

Aymeric CHABARDES

Médecin du travail du CNRS

Arnaud Vasseur

Médecin du travail-Coordonnateur du service de médecine de prévention et santé au travail d'Université Paris Cité

Isabelle ROQUE

Commission du personnel locale

Membres élu.es

Carla Carvalhais
Julien Coridian
Didier Laporte

Membres nommé.es

François Legrand
David Martin

À partir de février 2025 (après les élections du 6 février)

Conseil de laboratoire

Président ex-officio

Marco Zito

Membres ex-officio

Tristan Beau
Nabil Garroum
Évelyne Méphane

Membres élu.es

Mathieu Bernard
Sébastien Bongard
Carla Carvalhais

Mathieu Guigue
Jean-Luc Meunier
Irena Nikolic
Éric Pierre
Sophie Trincaz-Duvoid

Membres nommé.es

Alexandre Lantheaume
Francesco Polci
Luca Scotto
Représentant.e des étudiant.e
Anaëlle Chalumeau
Représentant.e des postdocs
William Saenz Arevalo (jusqu'à mi 2025)
Pablo Correa Camiroaga (depuis mi-2025)

Conseil scientifique

Membres extérieur.es nommé.es

Christophe Yeche (SPP)
Guillaume Unal (CERN)

Membres élu.es

Claudio Giganti (président)
Didier Laporte
Olivier Martineau (secrétaire)
Jean-Luc Meunier
Sophie Trincaz-Duvoid
Pauline Zarrouk

Membres nommé.es

Jean-Marc Colley
Vava Gligorov
Didier Lacour

Membres ex-officio

Tristan Beau
Nabil Garroum
Marco Zito

Comité Local Hygiène et Sécurité et Conditions de Travail

Président

Marco Zito

Membres ex-officio

Tristan Beau
Nabil Garroum
Évelyne Méphane

Assistant.es de prévention

Carla Carvalhais
Alexandre Lantheaume

Conseiller RadioProtection

Julien Bolmont

Responsable sécurité Laser

Francesco Crescioli

Représentant.es du personnel

Mathieu Bernard
Sébastien Bongard
Éric Pierre
Sophie Trincaz-Duvoid

Ingénieur à la Direction de la Prévention des Risques Professionnels de la FSI-Sorbonne Université

Arnaud Abatord

Médecin du travail d'Université Paris Cité

Pol Bleunven

Ingénieur radioprotection de la Cellule Sureté Nucléaire et Radioprotection de l'IN2P3

Aymeric Chabardès

Cheffe Ingénieure à la Direction de la Prévention des Risques Professionnels de la FSI-Sorbonne

Sarah Chimbault

Responsable du Département

Transverse de Prévention des Risques Professionnels d'Université Paris Cité
Yann Coutard

Médecin du travail de Sorbonne Université

Laurent Hérin

Responsable de la Direction de la Prévention des Risques Professionnels de Sorbonne Université

Soraya Nebbache

Ingénieure du Département Transverse de Prévention des Risques Professionnels d'Université Paris Cité

Esther Portugais

Ingénieure Régionale de Prévention et de Sécurité de la Délégation CNRS Paris-Centre

Silvia Ricardo Paulo

Médecin du travail du CNRS

Arnauld Vasseur

Commission du personnel locale

Membres élu.es

Carla Carvalhais
Didier Laporte
Yann Orain

Membres nommé.es

François Legrand
David Martin

Chargé.es de mission et groupes de travail au 31 décembre 2025

Développement Durable

Tristan Beau
Mathieu Bernard (co-référent)
Delphine Hardin (référente)
Jean-Philippe Lenain
Carla Carvalhais
Véra De Sa Veranda
Anaëlle Chalumeau

Égalité professionnelle

Delphine Hardin (co-référente)
Sophie Trincaz-Duvoid (référente)

Formation

Frédéric Derue

Partenariats et valorisation

Nabil Garroum

Science ouverte

Olivier Dadoun

Patrimoine scientifique

Tristan Beau
Frédéric Derue
Olivier Dadoun (référent)

Sécurité

Assistant.es de Prévention

Carla Carvalhais
Alexandre Lantheaume

Conseiller en RadioProtection

Julien Bolmont

Responsable Sécurité Laser

Francesco Crescioli

Sécurité Informatique

Victor Mendoza
Patricia Warin-Charpentier

Bibliothèque

Laurent Le Guillou

Plateforme documentaire Atrium

Didier Laporte
Patricia Warin-Charpentier

Comité biennale 2024

Tristan Beau
Isabelle Cossin
Bogdan Malaescu
Jérémy Neveu
Marjorie Stievenart-Ammour
François Tousseneil

Réunions du Vendredi

Amar Hami
Olivier Martineau

Séminaires

Stéphanie Beauceron
Daniel Kerszberg

Nouveaux entrants

Mathieu Bernard

Cellule contrats de recherche

Tristan Beau
Frédéric Derue
Vladimir Gligorov

Web et réseaux sociaux

Tristan Beau
François Legrand
Sophie Trincaz-Duvoid

Masters 2

Julien Bolmont
Eli Ben-Haim
Irena Nikolic
Pascal Vincent

Stages, Thèses, Ecoles Doctorales

Suivi des doctorant.es du laboratoire

Sophie Trincaz-Duvoid

Stages

Yajing Xing

École Doctorale

Tristan Beau
Julien Bolmont
Irena Nikolic
Pascal Vincent

Structures partenaires

COFECUB

Jose Ocariz

DIM ORIGINES

Julien Bolmont

IDPASC

Bertrand Laforge

Initiative Sorbonne Université Physique des infinis (jusqu'à 2024)

Christophe Balland
Sophie Trincaz-Duvoid

LA-CoNGA-Physics

Reina Camacho Toro

Jose Ocariz

PNCG

Nicolas Regnault

INDEX DES ACRONYMES

A

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrene (polymère)
ACHEP : African Conference on High Energy Physics
ACM : Alternative Clustering Methods
ACTA : Amplifier for Cherenkov Telescope Array
ADC : Analog to Digital Converter (CAN en français)
ADF : Amplitude Distribution Function
AGATE : Outil CNRS de gestion des Abscences, des Temps et des Activités
AGN : Active Galaxy Nuclei (AGN en français)
AI : Artificial Intelligence (IA en français)
AID : Agence d'Innovation de la Défense
AIDA : Advancement and Innovation for Detectors at Accelerators
AIPHY : Challenging AI with Challenges from Physics, réseau doctoral fondé par la commission Européenne dans le cadre des MSCA
ALICE : A Large Ion Collider Experiment (détecteur auprès du LHC)
ALP : Axion Like Particle
AM3N : Astrophysique MultiMessager et Matière Noire (équipe LPNHE)
AMA : Asymétrie Matière-Antimatière (équipe LPNHE)
AMD : Advanced Micro Devices (fabricant de semi-conducteurs)
ANF : Action Nationale de Formation
ANR : Agence Nationale de la Recherche
AP : Assistant.e de Prévention
APC : laboratoire AstroParticules et Cosmologie (Paris)
ARCES : Association des responsables de Communication de l'Enseignement Supérieur
ARIANE : plateforme de services et d'échanges RH du CNRS
ARM : Advanced RISC Machine
ASIC : Application Specific Integrated Circuit
ASNR : Autorité de Sécurité Nucléaire et de Radioprotection
ATCG : Action Thématique de Cosmologie et Galaxies
ATLAS : A Toroidal LHC Apparatus (détecteur auprès du LHC)

B

BAO : Baryon Acoustic Oscillations
BAP : Branche d'Activité Professionnelle
BEACON : Beamforming Elevated Array for Cosmic Neutrinos (prototype de détecteur radio)
BEBC : Big European Bubble Chamber
BEGES : Bilan des Émissions de Gaz à Effet de Serre
BEH : Brout-Englert-Higgs (mécanisme de)
BGS : Bright Galaxy Survey
BIATSS : Bibliothécaires, Ingénieurs, Administratifs, Techniciens, Personnels Sociaux et de Santé
BMW : Budapest-Marseille-Wuppertal (collaboration)
BOSS : Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
BSU : Bibliothèque de Sorbonne Université
BTP : Bâtiment et Travaux Publics
BTS : Brevet de Technicien Supérieur

C

CA : Conseil d'Administration
CAN : Convertisseur analogique - numérique (ADC en anglais)
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
CBHE : Capacity Building for Higher Education (programme ERASMUS)
CBP : Collimated Beam Projector
CCD : Charge Coupled Device
CCIN2P3 : Centre de Calcul de l'IN2P3
CCRI : Comité de coordination du Réseau des informaticiens de l'IN2P3 et de l'IRFU
CDD : Contrat de travail à Durée Déterminée
CDI : Contrat de travail à Durée Indéterminée
CDM : Cold Dark Matter
CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives
CENS : Conseil des Enseignements
CERN : Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (laboratoire européen pour la physique des particules, Genève)
CFA : Centre de Formation des Apprentis ou Conseil de Faculté
CFM : Capital Fund Management (fondation CFM pour la recherche)
CIMES : Capteurs, Instrumentation et Mesures (master)
CKM : matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa
CL : Conseil de Laboratoire
CLAP : Capteur à LA Pointe (plateforme)
CLAS : Comités Local d'Action Social (du CNRS)
CLFV : Charged Lepton Flavor Violation
CLHSCT : Comité Local d'Hygiène, Sécurité, et Conditions de Travail
CMB : Cosmic Microwave Background

CMS : Compact Muon Solenoid (détecteur auprès du LHC)
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
CNU : Conseil National des Universités
COFECUB : Comité Français d'Évaluation de la Coopération Universitaire et Scientifique avec le Brésil
COMET : COherent Muon to Electron Transitions (expérience auprès de J-PARC)
COMETA : Comprehensive Multiboson Experiment-Theory Action (qui est une COST Action)
COPENS : COmmission des Personnels ENSeignants
COPIL : COmité de PILotage
COPIN : COnsortium Polonais des Institutions Nucléaires
COREGAL : CORrespondant.e ÉGALité
COS : COmité de Sélection
COSI : Café Ouvert Sciences et Ingénierie
COST : COopération européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique
COVID : COronaVirus Disease
CP : Charge-Parity
CPJ : Chaire Professeur Junior
CPL : Commission du Personnel Locale
CPPM : Centre de Physique des Particules de Marseille
CPT : Centre de Physique Théorique (de Marseille)
CPU : Central Processing Unit
CRDPS : Commission Régionale de Développement Professionnel et Social
CRP : Conseiller en RadioProtection
CS : Conseil Scientifique
CSC : Chinese Scholarship Council
CSSI : Correspondant.e Sécurité Système d'Information
CTA : Centrale de Traitement de l'Air
CTAO : Cherenkov Telescope Array Observatory

D

DAE : Débrillateur Automatisé Externe
DAMIC : DArk Matter In CCD
DAMIC-M : DAMIC in Modane
DAQ : Data Acquisition (system)
DARWIN : DArk matter WImp search with liquid xenON
DATI : Dispositif d'Alarme du Travailleur Isolé
DCI : Département du Cycle d'Intégration (de SU)
DD : Développement Durable
DESI : Dark Energy Spectroscopic Instrument
DESY : Deutsches Elektronen-Synchrotron
DFG : Deutsche Forschungsgemeinschaft (équivalent allemand de l'ANR)
DHMZ : Davier, Hoecker, Malaescu, Zhang (methodology)
DIM : Domaine d'Intérêt Majeur
DM : Dark Matter
DMF : DéMatérialisation des Factures
DMZ : groupe formé de Michel Davier, Bogdan Malaescu et Zhiqing Zhang
DOI : Digital Object Identifier
DR : Directeur.ice de Recherche ou Délégation Régionale (du CNRS)
DRD : Detector R&D
DRH : Direction des Ressources Humaines
DRU : Differential Rate Units
DTBP : Digital Trigger Back Plane (dans le cadre de CTAO)
DU : Directeur d'Unité ou Detector Unit (pour HGTD)
DUNE : Deep Underground Neutrino Experiment

E

EAD : Enseignement À Distance
EC : Enseignant.e Chercheur.euse
ECFA : European Committee for Future Accelerators
ECTS : European Credit Transfer and Accumulation System
ED : École Doctorale
EDDIS : Estimation de Distance pour les Relevés Incomplets de Supernovae
EFT : Effective Field Theory
EGES : Émission des Gaz à Effet de Serre
EGI : European Grid Infrastructure
ENS : École Normale Supérieure
EOS : EOS Open Storage (acronyme auto-récursif)
EOSC : European Open Science Cloud
EPI : Équipement de Protection Individuelle
EPS : European Physical Society
ERASMUS : EuRopean Action Scheme for the Mobility of University Students
ERC : European Research Council
ERIC : European Research Infrastructure Consortium
ESNT : Espace de Structure Nucléaire Théorique (CEA)

ESPCI : École Supérieure de Physique et de Chimie de la ville de Paris
ESPP : European Strategy for Particle Physics
ESPPU : ESPP Update
ESR : Enseignement Supérieur et Recherche
ETH : École polytechnique fédérale de Zurich
EU : European Union
EW : ElectroWeak

F

F4SCT : Formations Spécialisées de Service en matière de Santé, de Sécurité et des Conditions de Travail
FA : Fabrication Additive
FASER : Forward Search Experiment (expérience auprès du LHC)
FBK : Fondazione Bruno Kessler
FCC : Future Circular Collider
FCCP : Flavour Changing and Conserving Processes (workshop)
FCNC : Flavour Changing Neutral Current
FCPPN : France-China Particle Physics Network
FEB : Front End Board
FEI : Fonctionnement, Équipement, Investissement
FFP2 : Filtering FacePiece de type 2 (masque de protection autofiltrant)
FH : Forschung Hochenergiephysik (Recherche en physique des hautes énergies)
FJPPN : France-Japan Particle Physics Network
FPGA : Field-Programmable Gate Arrays (circuit logique programmable)
FPM : Focal Plane Module
FRIF : Fédération de Recherche des Interactions Fondamentales
FSI : Faculté des Sciences et Ingénierie (de SU)
FSRQ : Flat Spectrum Radio Quasar
FTK : FastTracker
FWHM : Full-Width at Half-Maximum

G

GBT : GigaBit Transceiver
GDR : Groupement De Recherche
GESLAB : outil de Gestion financière des Laboratoires
DFG : Deutsche Forschungsgemeinschaft (équivalent Allemand de l'ANR)
GLPI : outil de Gestion Libre de Parc Informatique
GNN : Graph Neural Networks
GNSS : Global Navigation Satellite System
GP300 : GRANDProto 300 (GRAND)
GPS : Global Positioning System
GPU : Graphics Processing Unit
GRAND : Giant Radio Array for Neutrino Detection
GRIF : Grille en Île-de-France
GSH : Gestionnaire des Services Hébergés

H

HAL : Hyper Articles en Ligne (archive ouverte en ligne)
HA-TPC : High-Angle TPC
HAWC : High Altitude Water Cherenkov
HBM : High Bandwidth Memory
HCW : Hadronic Calibration Workshop
HDR : Habilitation à Diriger les Recherches
HECAP : High Energy, Cosmology and Astroparticle Physics (symposium)
HEP : High Energy Physics
HERON : Hybrid Elevated Radio Observatory for Neutrinos
HESS : High Energy Stereoscopic System
HFLAV : Heavy Flavor Averaging Group
HGTD : High Granularity Timing Detector
HK : HyperKamiokande
HL-LHC : High Luminosity LHC
HLT : High Level Trigger
HMBS : Higgs, Multi-Boson and SUSY Searches
HPS : Hard Processor System
HRS4R : Human Resources Strategy for Researchers (label européen)
HSC : Hyper Suprime Cam (caméra installée sur le télescope Subaru)
HVP : Hadronic Vacuum Polarisation

I

IA : Intelligence Artificielle (AI en anglais)
IAC : International Advisory Committee
IAP : Institut Astrophysique de Paris
IATSS : personnels Ingénieurs, Administratifs, Techniques, Sociaux et de Santé
ICHEP : International Conference on High Energy Physics
ICRC : International Cosmic Ray Conference
IDEA : Innovative Detector for Electron-positron Accelerator (for FCC)

IDPASC : International Doctorate Network in Particle Physics, Astrophysics and Cosmology
IEA : International Energy Agency
IFJ-PAN : Instytut Fizyki Jądrowej PAN (Henryk Niewodniczański Institute of Nuclear Physics in Poland)
IFSEM : service mutualisé du CNRS en Ile-de-France (pour la formation permanente)
IHEP : Institute of High Energy Physics
IJCLAB : Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie
IML : Inter-experiment Machine Learning
IN2P3 : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules
INFN : Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Institut National de Physique Nucléaire, Italie)
INFRA-TECH : programme Européen d'INFRAstructure de recherche pour une nouvelle génération d'instruments, d'outils, de méthodes scientifiques et de solutions numériques avancées, favorisant l'innovation et la co-création avec l'industrie
INSP : Institut des NanoSciences de Paris
IP : Internet Protocole
IPC : Institute of Printed Circuits (standard de qualité)
IPHC : Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (Strasbourg)
IPI : Initiative Physiques des Infinis (de SU)
IR : Ingénierie de Recherche
IRA : Infections Respiratoires Aiguës
IRAP : Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (Toulouse)
IRF : Instrument Response Function
IRFU : Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers (CEA)
IRL : International Research Laboratory
IRN : International Research Network
ISC-PIF : Institut des Systèmes Complexes - Paris Île-de-France
ISO : International Organization for Standardization
ISR : Initial State Radiation
ISS : International Space Station
IT : personnels Ingénieurs et Techniciens
ITA : personnels Ingénieurs, Techniciens et Administratifs
ITK : Inner Tracker (de ATLAS)
ITN : Innovative Training Networks
IUT : Institut Universitaire de Technologie

J

JCAP : Journal of Cosmology and Astroparticle Physics
JCJC : Jeunes Chercheuses Jeunes Chercheurs (colloque)
JHEP : Journal of High Energy Physics
JINST : Journal of Instrumentation
JP : Jacob & Piran (LIV models)
J-PARC : Japan Proton Accelerator Research Complex
JRJC : Journées de Rencontres Jeunes Chercheurs
JUNO : Jiangmen Underground Neutrino Observatory

K

KCETA : KIT Center Elementary Particle and Astroparticle Physics
KEK : 高エネルギー加速器研究機構, Kō Enerugī Kasokuki Kenkyū Kikō, Organisation de recherche avec des accélérateurs de haute énergie (Japon)
KIT : Karlsruhe Institut für Technologie
KM3Net : Cubic Kilometre Neutrino Telescope

L

LABEX : Laboratoire d'Excellence
LACoNGA : Latin American alliance for Capacity building in Advanced physics
LAR : Liquid Argon (detector in ATLAS)
LASF4RI : Latin American Strategy Forum for Research Infrastructure
LAT : Large Area Telescope (instrument à bord du satellite Fermi)
LBC : Low Background Chamber
LBL : Low Background Level
LBLN : Lawrence Berkeley National Laboratory
LCG : LCG : LHC Computing Grid
LCQB : Laboratory of Computational and Quantitative Biology (Paris)
LDM : Light Dark Matter
LED : Light-Emitting Diode
LEMAITRE : Latest Extended Mapping of Acceleration with an Independent Trove of Redshifted Explosions
LEP : Large Electron-Positron Collider (au CERN)
LGAD : Low-Gain Avalanche Diode
LHC : Large Hadron Collider (at CERN)
LHCb : Large Hadron Collider beauty experiment
LHCONE : Large Hadron Collider Open Network Environment
LHCP : Large Hadron Collider Physics (conference)
LIP6 : Laboratoire d'informatique (de l'ex-Paris 6) du SU
LIRA : Laboratoire d'instrumentation et de recherche en astrophysique (PSL)
LIV : Lorentz Invariance Violation
LJP : Lund Jet Plane
LKB : Laboratoire Kastler Brossel
LL-ALP : Long Lived ALP

LLM : Large Language Model
LLP : Long Lived Particle
LLR : Laboratoire Leprince-Ringuet (École Polytechnique - Palaiseau)
LNGS : Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Italie)
LPC : Laboratoire de Physique de Clermont
LPCA : Laboratoire de Physique de Clermont Auvergne
LPENS : Laboratoire de Physique de l'ÉNS (Paris)
LPNHE : Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies (Paris)
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
LTE : Laboratoire Temps Espace (Paris), anciennement
LUPM : Laboratoire Univers et Particules de Montpellier
LUX : Large Underground Xenon experiment
LZ : LUX-ZEPLIN (experiment)

M

MAGIC : Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope
MC : Monte Carlo (technique)
MCF : Maître de Conférences
MESRI : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de l'Innovation
MIF : Masses et Interactions Fondamentales (équipe LPNHE)
MIT : Massachusetts Institute of Technology
ML : Machine Learning
MMT : Machine à Mesurer Tridimensionnelle
MOCN : Machine Outil à Commande Numérique
MoU : Memorandum of Understanding
MPP : Max-Planck-institute für Physik
MS : Modèle Standard (de la physique des particules)
MSC : laboratoire Matière et Systèmes Complexes (Paris)
MSCA : Marie Skłodowska-Curie Actions
MST : Medium-Sized Telescope

N

NAG : noyau actif de galaxie (AGN en anglais)
NASA : National Aeronautics and Space Administration (USA)
ND : Near Detector
NGC : New General Catalogue
NIM : Nuclear Instruments and Methods in physics research (journal)
NIST : National Institute of Standards and Technology (USA)
NMC : Nectar Module Controller (on CTA)
NN : Neural Network
NOvA : NuMI Off-axis ve Appearance (experiment)
NPAC : parcours Noyau, Particules, Astroparticules et Cosmologie (M2)
NRZ : Non Return to Zero
NSIP : Nouveau Système d'Information Projets (de l'IN2P3)
NV : Neutron Veto (dans XENON)

O

OHP : Observatoire de Haute Provence
ODISSEE : Online Data Intensive Solutions for Science in the Exabytes Era
OPC-UA : Open Platform Communication Unified Architecture
OS : Operating System
OWID : Our World In Data (database)

P

PAF : Physique ATLAS France (journées)
PCB : Printed Circuit Board
PC-CF : PolyCarbonate Carbon Fiber (polymère)
PCR : Conseiller en RadioProtection
PCS : Plateforme Calcul et Stockage
PDF : Probability Density Function
PDG : Président Directeur Général
PEEK : PolyEtherEtherKetone (polymère)
PEI : PolyEtherImide (polymère)
PHENIX : Particles, Hadrons, Energy, Nuclei, Instrumentation, Imaging, Cosmos et Simulation (école doctorale Paris Saclay)
PI : Principal Investigator
PIF : Physique en Île-de-France (école doctorale)
PKS : ParKeS Radio Sources Catalogue
PLA : PolyLactic Acid (polymère)
PLL : Phase Locked Loop
PME : Petites et Moyennes Entreprises

PMNS : Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (matrice)
PMT : Photo-Multiplier Tube (en anglais)
PNCG : Programme National de Cosmologie et Galaxies
PON : Passive Optical Network
PPC : Particle Physics and Cosmology (IRL)
PR : PRofesseur.e (d'université)
PRC : Projet de Recherche Collaborative
PRCI : PRC International
PRIDE : PROgrammable Intelligence on DEtector
PSF : Point Spread Function
PSI : Paul Scherrer Institute (Suisse)
PSL : Paris Sciences et Lettres (université)
PTI : Protection du Travailleur Isolé
PUMA : avis de PUblicité pour les Marchés à procédure Adaptée

Q

QCD : Quantum ChromoDynamics
QED : Quantum ElectroDynamics
QG : Quantum Gravity
QGMM : Quantum Gravity phenomenology in the Multi-Messenger approach

R

RAM : Random Access Memory
RAPAC : RAPport d'ACTivité
R&D : Recherche et Développement
RDM : Réseau des Mécaniciens
RENATER : Réseau National de Télécommunications pour la technologie, l'Enseignement et la Recherche
RESINFO : Fédération des réseaux métiers d'Administrateurs Systèmes et Réseaux dans l'Enseignement et la Recherche
RH : (service des) Ressources Humaines
RICH : Ring Imaging Cherenkov counter
RIPEC : Régime Indemnitaire des Personnels Enseignants et Chercheurs
RISC : Reduced Instruction Set Computer
RMS : Root Mean Square
ROHS : Restriction Of Hazardous Substances
RPA : Random Phase Approximation
RPP : Rencontres de Physique des Particules
RSL : Référent Sécurité Laser
RTA : Real Time Analysis (projet LHCb)
RUB : Ruhr Universität Bochum (Allemagne)

S

SA : Sénat Académique (de UPCité)
SAFIR : Système d'Analyse par Faisceaux d'Ions Rapides (à l'INSP)
SAFR : SA en Formation Restreinte
SATT : Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies
SCoTeP-K : School of Computational Techniques for Physics Students in Kenya
SDSS : Sloan Digital Sky Survey
SEMA-ML : SEarching for dark Matter with Advanced Machine Learning modelling
SESAME : dispositif francilien de soutien aux projets de recherche nécessitant l'achat de matériel
SESI : Systèmes Embarqués et Systèmes Intégrés (master)
SFP : Société Française de Physique
SHINE : SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment
SI : Service Informatique
SIGFIC : Système d'Information de Gestion Financière des Contrats
SILAFAE : Simposio Latinoamericano de Física de Altas Energias (Latin American Symposium on High Energy Physics)
SIMDET : School of Semiconductor Detector Simulation
SIRHUS : Système d'Information Ressources Humaines des Unités et des Services
SK : Super Kamiokande
SLAC : Stanford Linear Accelerator Center
SMARTHEP : Synergies between Machine Learning, Real Time analysis and Hybrid architectures for efficient Event Processing
SN : SuperNova
SNe : SuperNovæ
SNLS : Supernova Legacy Survey
SNOLAB : Laboratory of the Sudbury Neutrino Observatory
SOC : Scientific Organizing Committee
SPP : Service de Physique des Particules (CEA)
SPRINT : Sorbonne Physique Recherche Intensive et Nouvelles Technologies (licence)
SPS : Super Proton Synchrotron (CERN)
SST : Small-Sized Telescope / Sauveteur Secouriste du Travail
STEP'UP : Sciences de la Terre et de l'Environnement et Physique de l'Univers de Paris (école doctorale)
SU : Sorbonne Université
SUBATECH : laboratoire de physique SUBAtomique et TECHnologies associées (Nantes)
SUDOC : Système Universitaire de DOcumentation
Super-FGD : Super Fine-Grained Detector (détecteur proche T2K)

SUSY : SUpEr SYmetry
SWGGO : Southern Wide-Field Gamma-Ray Observatory
SYRTE : laboratoire SYstèmes de RéfÉrence Temps-Espace (Observatoire / SU)

T

TAUP : Topics in Astroparticle and Underground Physics (conference)
TCT : Transient Current Technique
TDAQ : Trigger and Data AcQuisition
TDM : Time Distribution Module
TEAMLAB : réseau de l'IN2P3 en management
TESSERACT : Transition Edge Sensors with Sub-eV Resolution and Cryogenic Targets
TLEP : Triple the size of LEP
TMEX : Theory Meets EXperiments (rencontres du Vietnam)
TP : Travaux Pratiques
TPC : Time Projection Chamber
TRIUMF : originellement TRI University Meson Facility (Canada)
TTC : Timing, Trigger and Control system
TV : TéléVision
TWEPP : Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (workshop)

U

UAN : Universidad Antonio Nariño (Colombie)
UCN : Ultra-Cold Neutron
UE : Unité d'Enseignement
UFBA : Universidade Federal da Bahia (Brésil)
UFR : Unité de Formation et de Recherche
UFRJ : Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brésil)
UGA : Université Grenoble Alpes
UHE : Ultra High Energy
UK : United Kingdom
UPCité (voire UPC) : Université Paris Cité

UPS : Université Paris Saclay
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
VHEPU : Very High Energy Phenomena in the Universe (rencontres de Moriond)
VHSIC : Very High Speed Integrated Circuit
VIL : Violation de l'Invariance de Lorentz
VM : Virtual Machine
VPN : Virtual Private Network

W

WATCH : assessment of WAtER resources from muon Tomography in the Chyulu Hills, Kenya (projet)
WBS : Work Breakdown Structure
WG : Working Group
WIMP : Weakly Interactive Massive Particle
WLCG : World LHC Computing Grid

X

XENON : XENON Dark Matter Search Experiment
XLZD : Dark Matter Detection Consortium (XENON, LZ and DARWIN experiments)

Z

ZARM : Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (Bremen)
ZEPLIN : ZonEd Proportional scintillation in LIquid Noble gases (experiment)
ZTF : Zwicky Transient Facility

Directeur de la publication

Marco Zito

Coordination éditoriale

Tristan Beau

Comité de rédaction

Tristan Beau, Stéphanie Beauceron, Sébastien Bongard, Jean-Marc Colley, Claudio Giganti, Daniel Kerszberg, Jean-Luc Meunier, Marco Zito

Remerciements à

Olivier Dadoun, Frédéric Derue, Jean-Philippe Lenain, Sophie Trincaz-Duvoid

Conception graphique

Jean-Jacques Daigremont

jean-jacques.daigremont@orange.fr

Crédits photos

CEA, CERN, CNRS/IN2P3, collaboration ATLAS, collaboration COMET, collaboration Hyper-Kamiokande, collaboration LHCb, collaboration T2K, collaboration GRAND / O. Martineau, collaboration HESS consortium CTAO-NectarCAM / J.-P. Lenain, IN2P3/CNRS, Université de Washington, Vera Rubin Observatory, Tristan Beau, Yolande Bonnet, Anja Butter, Carla Carvalhais, Olivier Dadoun, Claire Dalmazzone, Guillaume Daubard, Frédéric Derue, Daniel Ferlewicz, Nabil Garroum, Frédéric Girard, Thorsten Lux, Victor Mendoza, Satoshi Mihara, Jérémy Neveu, Gitene Tiberius Nyanga'u, Jules Perrin de Brichambaut, Boris Popov, Lydia Roos, Mireia Nieves Rosillo, Michaël Roynet, Vera de Sá-Varanda, Marjorie Stievenart-Ammour, Diego Terront, 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/spip.php?article82>

Illustration de la première page

La caméra LSST au cœur du télescope Simonyi de l'observatoire V.Rubin. ©T.Lange (SLAC)

Impression

COPYMÉDIA

Parc activité du Courneau

1b avenue de Guitayne

33610 Canejan

Mars 2026

RAPPORT D'ACTIVITÉ 2024-2025

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>