



# Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies UMR 7585

Évaluation HCERES - période 2017-2022 - portfolio





---

## Introduction

---

Le portfolio du laboratoire a été constitué à partir des réflexions des équipes, qui ont sélectionné des éléments représentatifs de la production scientifique et technique du laboratoire.

Sans doute un jalon de première importance a été franchi en octobre 2019 avec la livraison à SLAC (États-Unis) du système de changeur de filtres de LSST, qui a ensuite fait l'objet d'une première mise en service réussie. Il s'agit d'un ensemble mécatronique capable d'effectuer un changement de filtre en 83 s, élément-clé du programme du grand relevé photométrique de LSST (une deuxième unité « spare » du changeur sera visible dans nos locaux lors de la visite). Ce système a nécessité l'engagement d'une équipe d'une quinzaine d'ingénieurs et techniciens du LPNHE depuis 2007, avec la participation de cinq laboratoires de l'IN2P3 et une intégration et des tests dans notre hall de montage.

Toujours dans le cadre de nos contributions techniques, il faut signaler les deux TDR ATLAS de ITk et HGTD, réalisés avec des contributions importantes par l'équipe du LPNHE : elle a dessiné les senseurs à pixels produits par une des fonderies et est impliquée dans la conception de la puce de lecture (collaboration RD53). Pour HGTD, le groupe a conçu les unités de détection, en particulier la structure mécanique, et est impliqué dans les études de performance et les tests en faisceau. D'autres réalisations techniques importantes et en cours concernent le système de lecture des caméras NectarCAM de CTA (livrable FEB), où le LPNHE a une responsabilité de coordination technique à niveau national, et l'électronique « back-end » (ou aval) du SciFi de LHCb, qui a dû faire face à de contraintes sévères et est emblématique de nos compétences en électronique numérique.

Concernant les expériences qui démarrent leur prise de données, il faut mentionner la « première lumière » pour StarDICE, une expérience de photométrie de précision (transfert des standards de flux de laboratoire à des étoiles observables), au niveau du pour mille, qui permettra d'exploiter pleinement la puissance statistique de ZTF-II et ensuite de LSST pour les contraintes cosmologiques. La prise de données de StarDICE a démarré en décembre 2022 à l'OHP et est en cours. Signalons également une première année de prise de données très réussie pour DESI, un relevé spectrographique de grande envergure, avec une contribution du laboratoire au système d'étalonnage ainsi qu'à la sélection des cibles, et dont les

premiers résultats, notamment sur le BAO, devraient être publiés début 2024. Une place particulière dans le portfolio est consacrée à nos résultats scientifiques :

- la recherche de nouveaux phénomènes dans le canal di-jet par l'expérience ATLAS, qui a permis d'exclure l'existence de quarks excités avec une masse inférieure à 6 TeV
- la découverte par HESS de l'émission de gammas de très haute énergie dans l'*afterglow* d'un sursaut gamma : cette émission démontre pour la première fois la présence de particules d'énergies extrêmes dans les sursauts gamma, probablement accélérées dans une onde de choc créée par l'explosion initiale.
- l'article dans Nature de l'expérience T2K qui a permis d'exclure une large plage des valeurs possible pour le paramètre  $\delta_{CP}$  de la matrice PMNS de mélange des neutrinos, et les nouveaux résultats des tests de l'universalité leptonique dans les désintégrations  $b \rightarrow s\ell^+\ell$  par LHCb (mesure simultanée de  $R_K$  et  $R_{K^*}$ ), avec une contribution majeure du groupe du LPNHE, qui montrent un bon accord avec le Modèle Standard, et sonnent probablement le glas d'une hypothétique anomalie qui a beaucoup occupé la communauté.
- le succès du projet pionnier Allen/RTA de LHCb, un trigger logiciel basé sur des GPU proposé par l'équipe du LPNHE, capable de reconstruire les événements et les sélectionner à 30 MHz (4 Tb/s) en ligne, une première pour les expériences du LHC, est représentative des nouvelles directions prises par le laboratoire qui accélère dans la thématique de l'IA, en collaboration étroite avec le LIP6 et SCAI. Ce projet a été financé à l'origine par un ERC au LPNHE (RECEPT), a été approuvé par la collaboration LHCb et a suscité un grand intérêt de la part de l'IN2P3.

C'est sans doute dans le domaine de la recherche directe de la matière noire que les équipes du LPNHE ont contribué fortement avec de nouveaux résultats marquants : deux thèses effectuées au laboratoire dans le cadre de DarkSide-50 ont permis de placer les meilleures limites mondiales pour un WIMP léger (d'une masse autour de quelques GeV). L'équipe DAMIC a battu le record de la meilleure résolution sur la mesure d'énergie déposée dans le détecteur CCD grâce à la technique Skipper CCD, utilisée ensuite pour des limites de classe mondiale avec un prototype de DAMIC-M (interactions DM-électron), et l'équipe Xenon a placé des nouvelles contraintes sur la matière noire leptophilique (dark photon et ALP).

Les équipes du LPNHE jouent un rôle de *leadership* dans plusieurs expériences internationales où leur expertise est reconnue. Dans le cadre de HyperKamiokande, le LPNHE a proposé un système de génération et distribution d'horloge avec une précision de 100 ps, qui a été accepté par la collaboration, fruit entre autre d'une collaboration étroite avec le laboratoire SYRTE.

Pour ce qui est des grands projets de la prochaine décennie, nous avons commencé des études pour définir le programme de physique et le détecteur optimal pour FCC au CERN. GRAND est un projet d'astronomie des neutrinos UHE (la centaine de PeV), avec un grand réseau d'antennes radio. Ce projet a été conçu conjointement au LPNHE (un des trois porte-parole) et à l'IAP. Le *white paper* a permis d'élaborer le concept et d'identifier les verrous technologiques pour définir le chemin de la R&D actuelle, soutenue par une ANR, un financement post-doctoral de SU et bientôt une CPJ IAP-LPNHE, vers un réseau de très grande envergure. Trois antennes ont été déployées en 2022 à l'observatoire astronomique de Nançay pour un test système et vérifier les algorithmes de *trigger*.

---

## Équipe « Cosmologie et Énergie Noire »

---

L'équipe « Cosmologie et Énergie Noire » du LPNHE contribue à l'avancée des connaissances à travers plusieurs axes de recherche. L'étude de la distribution tridimensionnelle des galaxies à l'aide de relevés spectroscopiques vise à contraindre en particulier l'évolution du taux d'expansion cosmique avec le temps à l'aide des oscillations acoustiques des baryons (BAO). Depuis 2019, l'activité du groupe dans ce domaine prend place au sein de la collaboration DESI qui exploite un télescope et un instrument dédiés à cette science. Le plus gros contingent de l'équipe est impliqué dans LSST (ou Rubin), un télescope dédié à l'imagerie grand champ dont la première lumière est prévue dans un an. Cet instrument doit observer pendant 10 ans pour détecter de nombreux objets transients et obtenir une image profonde et complète du ciel du sud dans le visible. L'objectif central de ce relevé est d'observer les distorsions gravitationnelles des formes des galaxies lointaines dues aux masses en avant-plan, pour contraindre la statistique de cette distribution de masse et son évolution avec le temps. Mesurer ces distorsions subtiles suppose d'identifier et d'éliminer les distorsions instrumentales. LSST doit aussi permettre de mesurer des distances à de nombreuses supernovae, de manière à contraindre l'évolution cosmique du taux d'expansion et donc les propriétés de l'énergie noire. L'équipe continue d'exploiter cette sonde cosmologique avec des données récentes venues de ZTF et du télescope Subaru. La statistique de supernovae promise par LSST nécessite une précision d'étalonnage photométrique que les méthodes actuelles n'atteignent pas et que StarDice vise à améliorer. La statistique des contrastes de densité élevés ne sont pas prédits simplement par des méthodes analytiques de perturbation et nécessitent d'utiliser des simulations numériques. L'étude des artéfacts de ces simulations mobilise une partie de l'équipe. Cette activité doit aussi contribuer à analyser la fonction de corrélation des galaxies observée par DESI.





---

## Traitement des distorsions d'image

---

The shape of the photon transfer curve of CCD sensors, A&A 629 A36, 2019.

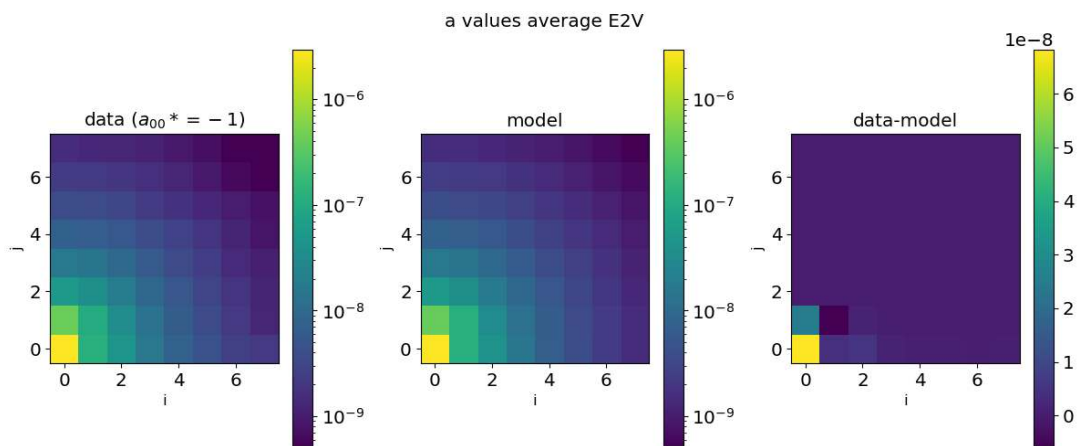
[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2019/09/aa35508-19/aa35508-19.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2019/09/aa35508-19/aa35508-19.html)

Correction of the brighter-fatter effect on the CCDs of Hyper Suprime-Cam, A&A 670, A118, 2023.

[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2023/02/aa45407-22/aa45407-22.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2023/02/aa45407-22/aa45407-22.html)

Improving the astrometric solution of the Hyper Suprime-Cam with anisotropic Gaussian processes, A&A, 650, A81, 2021.

[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2021/06/aa40463-21/aa40463-21.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2021/06/aa40463-21/aa40463-21.html)



*Changement relatif de surfaces des pixels (des CCD e2v de LSST) causé par un électron dans le pixel (0,0). Mesures à gauche, modèle électrostatique au milieu et différence à droite. Crédits DESC/LSST.*

En 2014, dans le cadre de ses études fines des effets instrumentaux, l'équipe a mis en évidence l'effet « brighter-fatter » qui affecte les images des CCD, et montré que l'effet est dû aux forces électrostatiques dans le senseur. Nous avons publié en 2019 une méthode précise de mesure de ces forces, à l'aide de l'évolution des covariances spatiales des champs plats avec l'intensité lumineuse (voir première référence). Cet article établit à la fois le lien entre les observables et les quantités d'intérêt, mais confronte aussi avec succès le modèle à des données de grande précision obtenues au laboratoire sur un CCD de LSST. La même méthode a été déployée sur la caméra HSC (sur le télescope Subaru) où l'on peut cette fois utiliser la mesure de l'électrostatique pour valider la qualité de la correction des images de science (voir seconde référence). Sur cette même caméra HSC, nous avons étudié la répétabilité des mesures de position des objets sur le ciel (à l'aide du code d'astrométrie que nous avons fourni à LSST) et avons mis en évidence la contribution des turbulences atmosphériques aux décalages des objets du champ, de l'ordre de quelques millièmes de secondes d'arc. Nous avons développé une modélisation de ces déplacements, et montré que LSST doit absolument implémenter une correction de ces distorsions.

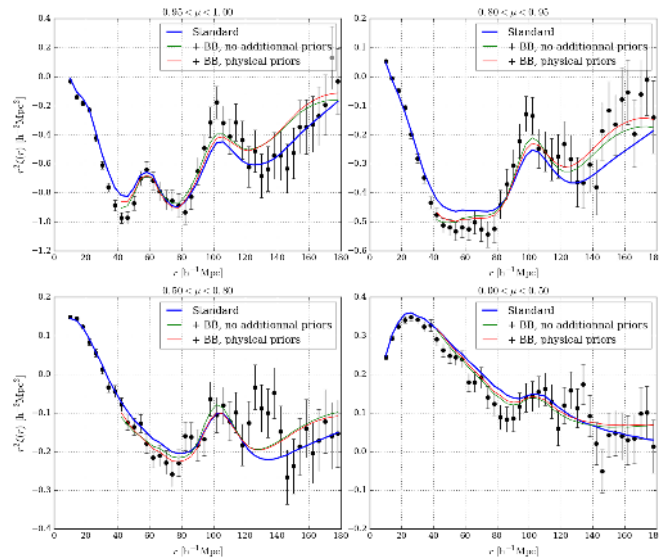
## Mesure du signal BAO dans la forêt Lyman des quasars distants de eBOSS, sélection des cibles pour DESI

Baryon acoustic oscillations at  $z = 2.34$  from the correlations of Ly absorption in eBOSS DR14, A&A, A85, 629, 2019.

[https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2019/09/aa35638-19/aa35638-19.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2019/09/aa35638-19/aa35638-19.html)

Preliminary clustering properties of the DESI BGS bright targets using DR9 Legacy Imaging Surveys, MNRAS, 509,1, 2022.

<https://academic.oup.com/mnras/article/509/1/1478/6380512>



*Mesure des corrélations des absorptions Ly- dans les forêts Ly- $\alpha$  et Ly- $\beta$  des quasars distants de eBOSS (DR14), dans quatre domaines de l'espace des séparations  $\mu = r_{\perp}/r$  ( $\mu = 1$  correspond à des quasars dans la ligne de visée). Les meilleurs ajustements obtenus avec le modèle standard des analyses BAO et deux variantes sont superposés aux mesures. Le signal BAO est l'excès de corrélation observé à  $r=(100/h)$  Mpc. Extrait de la première référence.*

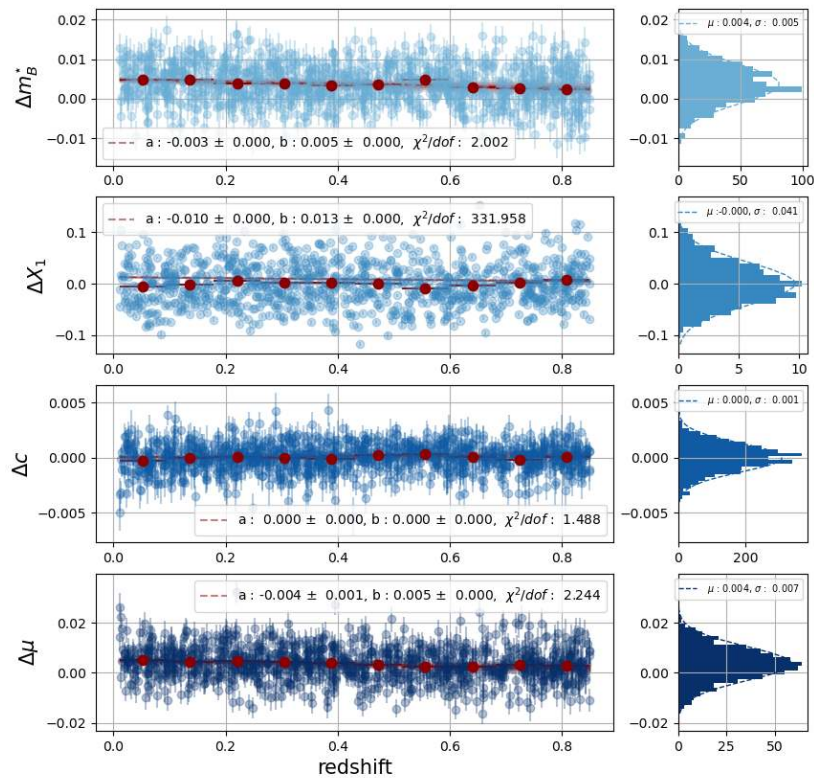
Sur la période, l'équipe a publié les mesures du signal BAO dans les régions d'absorption (forêts) Ly- $\alpha$  (en étendant l'étude à la région aussi affectée par Ly- $\beta$ ) des données eBOSS, ainsi que les contraintes cosmologiques qui découlent de leur modélisation : voir première référence. Les mesures de distances à  $z=2,34$  tiennent compte de nombreux effets systématiques qui affectaient les précédentes déterminations (influence des métaux, présence de régions fortement absorbantes dans la ligne de visée des quasars, etc.), et contribuent à la mesure de l'histoire du taux d'expansion jusqu'à un décalage spectral élevé, compatible avec le modèle le plus simple prédit par Planck. Cette même approche a conduit à une mesure de la constante de Hubble avec les BAO (avec toutes les données de eBOSS) qui confirme la tension dans la mesure de la constante de Hubble indépendamment de Planck. Outre ses activités instrumentales, l'équipe a par ailleurs contribué à la préparation de DESI en caractérisant la sélection des cibles de DESI, issues de relevés d'imagerie : voir seconde référence. Cette étude valide l'absence de biais significatif de la sélection des galaxies brillantes pour DESI, un aspect essentiel pour les études à venir.



## Du Subaru à ZTF

Caractérisation de l'énergie noire : développement d'une nouvelle génération de modélisation spectrophotométrique empirique des supernovæ de type Ia. These de Guy Augarde.

<https://theses.hal.science/tel-03927516v1>



*Étude des biais sur la reconstruction des distances standardisées des SNe avec le modèle NaCl sur un lot de données simulées. Les 3 panels du haut montrent la différence entre les paramètres  $X_0, X_1$  et couleur simulés et reconstruits en fonction du redshift. Le panel du bas présente la différence entre distances standardisées simulées et reconstruites. La reconstruction NaCl n'induit aucun biais dépendant du redshift.*

L'activité d'analyse de données supernovæ se poursuit sur plusieurs fronts : d'une part la production des courbes de lumière des supernovæ à grand  $z$  mesurées à l'aide du Subaru et du HST. L'acquisition des redshifts retarde la publication des distances, et nous avons décidé de publier des contraintes avec la centaine d'événements disposant d'un redshift, sans attendre l'arrivée sur le ciel de l'instrument PFS qui devra fournir une centaine de  $z$  encore manquants. Une partie de l'équipe a rejoint la collaboration ZTF, dans le cadre d'une contribution française, en finançant l'accès aux données avec une ANR et en fournissant les outils pour produire des courbes de lumière calibrées. La première livraison des données ZTF de précision est prévue en 2023. Dans la mesure où il s'agit de milliers d'événements, il est devenu nécessaire de réévaluer le modèle empirique de supernovæ SALT2 développé au laboratoire il y a 10 à 15 ans, et devenu le standard de fait dans toute la communauté. La mise au point de nouvelles méthodes pour réaliser cet ajustement a fait l'objet d'une thèse au laboratoire, en cours de publication.

---

## Première lumière de StarDICE

---



*Vue intérieure de la coupole de l'instrument robotique StarDICE lors de son déploiement sur le site de l'observatoire de haute provence. L'image est prise au démarrage d'un relevé qui accumulera une centaine de nuits de suivi d'une collection d'étoiles standard pour atteindre la précision nécessaire aux relevés ZTF et LSST. Décembre 2022 Collaboration StarDICE.*

L'utilisation de milliers de supernovae pour contraindre la cosmologie via les distances nécessite d'améliorer la qualité des standards photométriques utilisés pour intercalibrer les événements à différents redshifts, sous peine que les incertitudes de calibration dominant les incertitudes des paramètres cosmologiques. Le projet StarDICE vise à faire cela en transférant des standards de flux de laboratoire à des étoiles observables par tous, à une précision de l'ordre de un pour mille. C'est une entreprise longue et difficile et le télescope de StarDICE, soigneusement étalonné au laboratoire a vu sa première lumière stellaire à la fin de 2022, en même temps que la source calibrée qui sert à étalonner en continu sa réponse. Ce projet, qui implique 4 laboratoires français, est devenu un élément de LSST sur la période considérée par ce rapport.

---

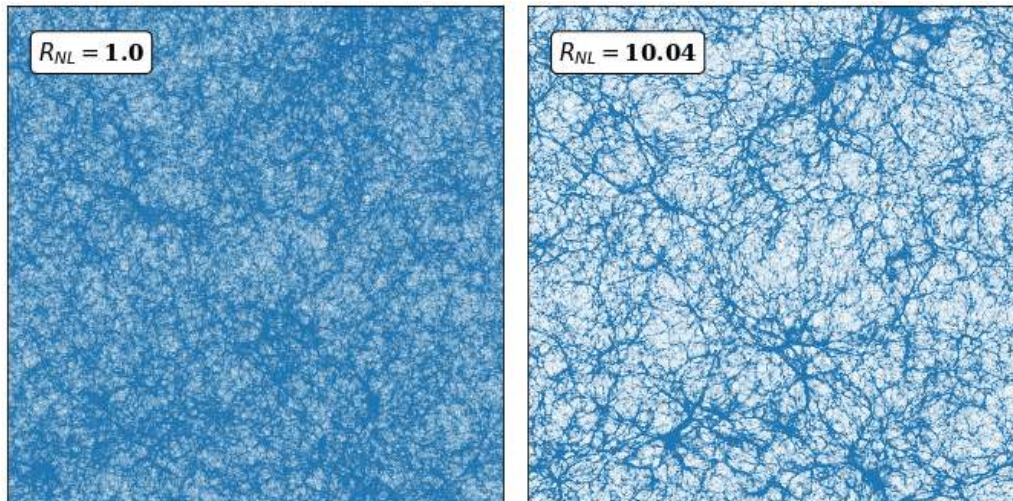
## Test des simulations à N corps avec des systèmes sans échelle

---

S. Maleubre, D. Eisenstein, L. Garrison and M. Joyce, MNRAS, Volume 512, Issue 2 (2022).

<https://academic.oup.com/mnras/article/512/2/1829/6544652>

<http://arxiv.org/abs/2109.04397>



*Deux configurations de matière noire dans une simulation à N corps d'une cosmologie « sans échelle » ; le paramètre  $R_{NL}$  correspond à l'échelle caractéristique de la non-linéarité.*

Les simulations à N corps sont le moyen privilégié d'étudier les effets non-linéaires de la gravitation, mais elles souffrent d'artefacts, qu'il est important de connaître et caractériser. Les conditions initiales de modèles cosmologiques « sans échelle » sont caractérisées par une fonction de corrélation en loi de puissance. De tels systèmes soumis à la gravitation doivent manifester la propriété dite « d'auto-similarité » lors de leur évolution. La réalisation de simulations à N corps de ces modèles permet, en exploitant cette auto-similarité, d'identifier les échelles spatiales artificiellement introduites par la simulation elle-même. Cette approche a permis d'identifier le domaine d'échelles spatiales dans lesquelles les résultats d'une simulation donnée sont fiables





---

## Équipe « Rayons Cosmiques et Matière Noire »

---

Le groupe « Rayons Cosmiques et Matière Noire » du LPNHE est impliqué dans la recherche concernant l'origine des rayons cosmiques et des processus liés à leur accélération dans les objets compacts astrophysiques, ainsi que dans l'investigation de la nature de la matière noire dans l'Univers.

Le groupe est ainsi impliqué dans trois expériences majeures en astroparticules, qui sont dans diverses étapes d'implémentation : H.E.S.S. en opération depuis 2003 en Namibie, explore l'Univers à travers les rayons gamma de très hautes énergies ; le futur observatoire CTA qui prendra le relai et actuellement en cours de construction ; l'expérience GRAND en cours de design qui sondera les neutrinos astrophysiques les plus énergétiques.

Concernant la matière noire, le groupe est impliqué dans trois expériences majeures de recherche directe, entre autres sous l'hypothèse de particules massives interagissant faiblement avec la matière (WIMP, pour Weakly Interacting Massive Particles en anglais) : XENON qui démarre la prise de données dans sa phase « n tonnes » ; DarkSide dont le principe de détection repose sur l'utilisation d'Argon liquide d'origine souterraine ; DAMIC qui se spécialise dans la recherche à basses masses.



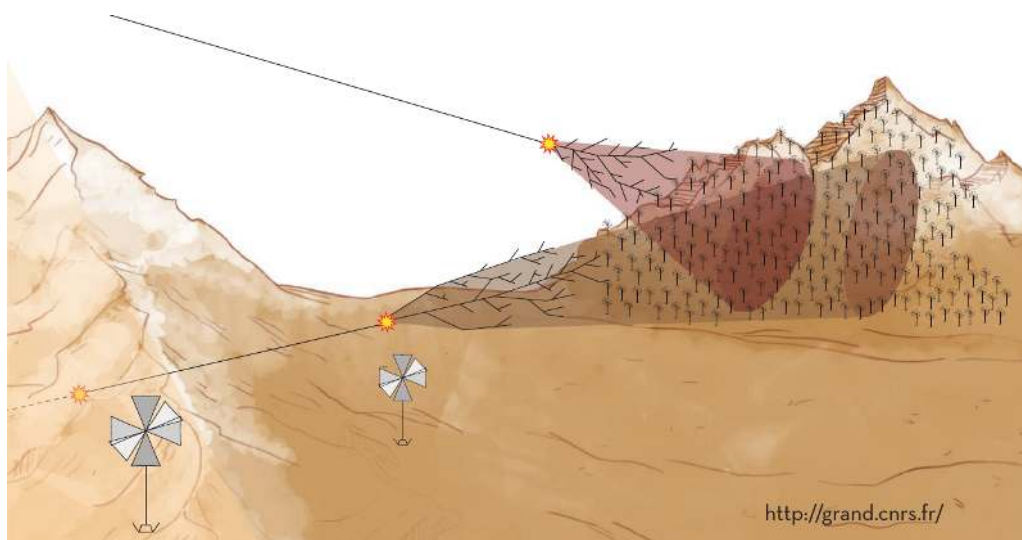
---

## GRAND, le réseau radio géant pour la détection de neutrinos : Science et design

---

J. Álvarez-Muñiz et al. (GRAND Collaboration), Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 63, 1 (2020)

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020SCPMA...6319501A/abstract>



*Concept du projet GRAND. Crédit Ingrid Gisela Delgado.*

Cet article présente le concept du projet GRAND, et ses objectifs scientifiques, avec une emphase particulière sur les neutrinos d'origine astrophysique de haute énergie (au-delà de  $10^{17}$  eV). Neutres et interagissant faiblement avec la matière, ceux-ci constituent des messagers astrophysiques extrêmement précieux car ils pointent directement vers leur source, et donnent des informations sur leurs sources jusqu'à des distances cosmologiques. Le principe de détection est basé sur le fait qu'un neutrino tau interagissant avec la Terre est susceptible de générer le lepton associé qui pourrait émerger dans l'atmosphère et y initier une cascade de particules en se désintégrant. Cette cascade est alors détectable via son émission électromagnétique dans le domaine radio, de quelques dizaines de MHz jusqu'à 200 MHz environ. Ce signal induit se propage sans atténuation dans l'atmosphère, et peut donc être détecté par des antennes radio, dispositifs extrêmement simples, robustes et peu onéreuses. L'instrumentation de surfaces gigantesques nécessaires pour détecter les très faibles taux d'événements attendus devient donc possible. GRAND serait constitué d'un réseau de 20 sous-détecteurs répartis à travers le monde, chacun constitué de 10 000 antennes couvrant une surface de 10 000 km<sup>2</sup>. L'estimation de sensibilité de GRAND présentée dans cet article se base sur une simulation élaborée et conduite au LPNHE, et démontre que le détecteur GRAND devrait être le plus sensible au monde, permettant de mesurer les neutrinos cosmogéniques générés par l'interaction des rayons cosmiques avec les photons du fond diffus cosmologique. Les résultats d'une autre étude menée au LPNHE montrent que la technique de détection permet d'atteindre des résolutions angulaires sur la direction d'origine du neutrino de l'ordre de  $0,1^\circ$ , une performance inégalable par d'autres techniques rendant possible la réalisation d'une véritable astronomie neutrino.

---

## La Critical Design & Manufacturing Readiness Review pour NectarCAM

---

Voir le fichier NectarCAM\_CDMR\_datapack\_20201105.tar.gz joint au dossier HCERES.



*Carte Front-End Board conçue au LPNHE pour l'acquisition, le traitement et le déclenchement du signal Cherenkov pour NectarCAM. Crédit LPNHE/J.-L. Meunier.*

Au sein du projet NectarCAM, l'équipe du LPNHE est en charge du livrable Front-End Board (FEB), constitué de la carte électronique de lecture et d'acquisition de chacun des 265 modules d'une caméra, du firmware et des interfaces logicielles avec les autres composants amont et aval de la FEB, ainsi que du développement des bancs de test déployés chez le sous-traitant pour la validation fonctionnelle de chaque FEB lors de la production. En 2019 et 2020, les membres de NectarCAM se sont préparés à la revue critique de conception et de préparation de la production (« Critical Design & Manufacturing Readiness Review » en anglais, CDMRR) organisée par l'Observatoire CTA. Cette revue, qui s'est tenue en février 2021, est une étape cruciale en vue de la validation par l'Observatoire des procédures de production, intégration, validation et de tests des neuf caméras NectarCAM à déployer sur le site Nord de CTA. Dans le cadre de la CDMRR, l'équipe du LPNHE a préparé un ensemble de documentations présentées ici.



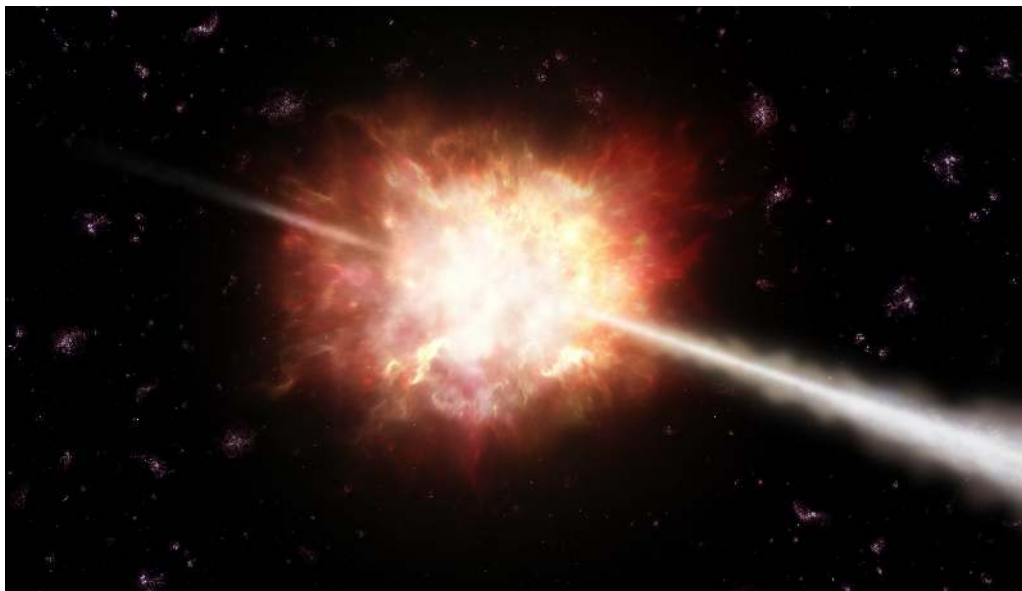
---

## Une émission à très haute énergie dans la phase rémanente d'un sursaut gamma

---

H.E.S.S. collaboration, Nature, 575, 464 (2019)

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019Natur.575..464A/abstract>



*Image d'artiste d'un sursaut gamma. Crédit ESO/A. Roquette.*

En 2019, deux sursauts différents ont été détectés aux très hautes énergies ( $E > 100$  GeV) avec les expériences MAGIC et H.E.S.S., ouvrant ainsi une nouvelle fenêtre observationnelle sur ces objets jusqu'à observés seulement par des satellites.

Le sursaut GRB 180720B a été très intense et a duré environ 50 secondes, une durée relativement longue indiquant que son origine est probablement la mort d'une étoile massive. Le cœur de l'étoile s'effondre alors pour donner un trou noir en rotation rapide. Le gaz environnant forme alors un disque d'accrétion entourant le trou noir, accompagné de jets de plasma ultra-relativistes qui sont à l'origine du sursaut gamma : des particules accélérées dans les jets interagissent avec la matière et/ou le rayonnement environnant et produisent alors de nombreux photons gamma.

La détection d'une émission au TeV démontre pour la première fois la présence de particules accélérées à des énergies extrêmes dans les sursauts gamma. Contrairement à ce que l'on pensait auparavant, elle indique également que ces particules existent encore, ou sont créées longtemps après le sursaut initial (l'émission prompte). L'hypothèse la plus vraisemblable est la présence d'une onde de choc dans le jet créée par l'explosion initiale, et se comportant comme un accélérateur cosmique de particules pouvant générer des photons au TeV.

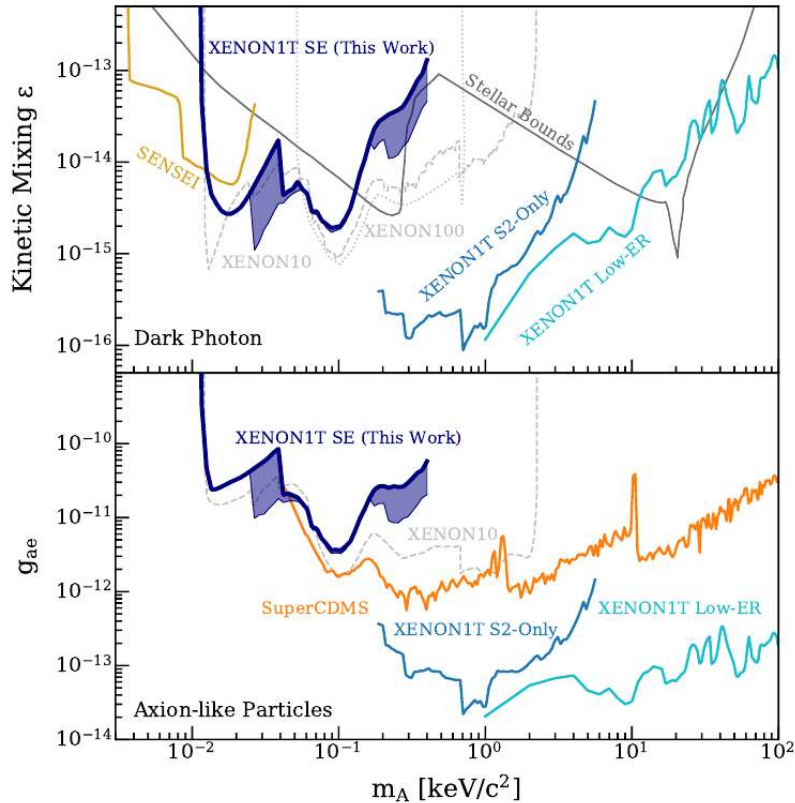
Le groupe H.E.S.S. du LPNHE a été impliqué sur cette étude à travers des simulations Monte Carlo dédiées à ces prises d'observations spécifiques, à travers un nouveau schéma de simulations dit « run-wise » (Holler et al., 2020) permettant des résultats d'analyse contrôlant mieux les erreurs systématiques, ainsi que dans la revue interne des analyses de données H.E.S.S. et leur interprétation.

## Résultats sur la recherche de matière sombre leptophilique de l'expérience XENON1T

Emission of single and few electrons in XENON1T and limits on light dark matter, E. Aprile et al., Phys. Rev. D 106, 022001.

<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.106.022001>

<https://arxiv.org/abs/2112.12116>



*Limites supérieures à 90% du niveau de confiance pour la matière noire bosonique via les « dark photons » (haut) et les « Axion-Like-Particles » (bas) en fonction de la masse de la matière noire en fonction de la masse de DM  $m_A$ .*

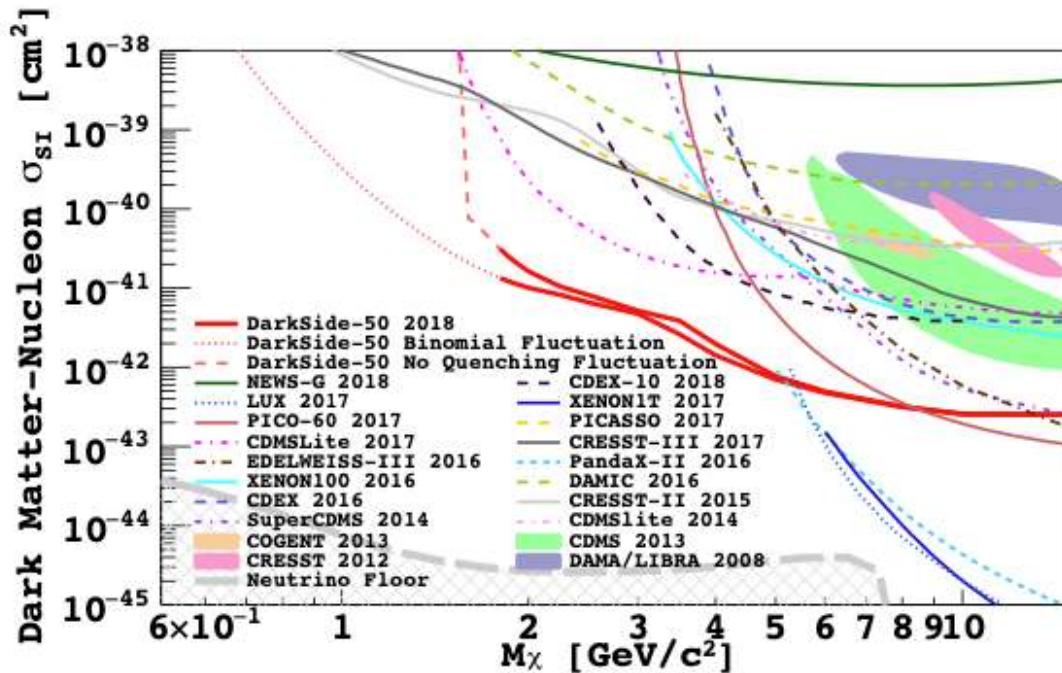
Le LPNHE a fourni une contribution majeure à l'analyse de XENON1T de recherche d'un type particulier de matière sombre, à la fois légère et interagissant avec les électrons. Différents modèles de matière sombre sont conformes à ces critères : matière sombre fermionique ou bosonique scalaire qui interagit directement avec un électron orbital ; matière sombre pseudo-scalaire (voir image) qui inclut des ALPs (axion like particles) et des photons sombres ; matière sombre bosonique produite par le Soleil et interagissant à travers les photons sombres. Pour chacun de ces modèles, des limites d'exclusion explorant des territoires inconnus ont été obtenues grâce à un travail important de caractérisation de plusieurs bruits de fond produisant chacun une poignée d'électrons d'ionisation.

## À la recherche de WIMPs de basse masse avec DarkSide-50

Low-Mass Dark Matter Search with the DarkSide-50 Experiment, Phys.Rev.Lett. 121 (2018) 8, 081307.

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.121.081307>

<https://arxiv.org/abs/1802.06994>



Limites supérieures à 90% du niveau de confiance obtenu par DarkSide-50 sur la probabilité d'interaction de WIMPs avec une masse supérieure 1,8 GeV/c<sup>2</sup>.

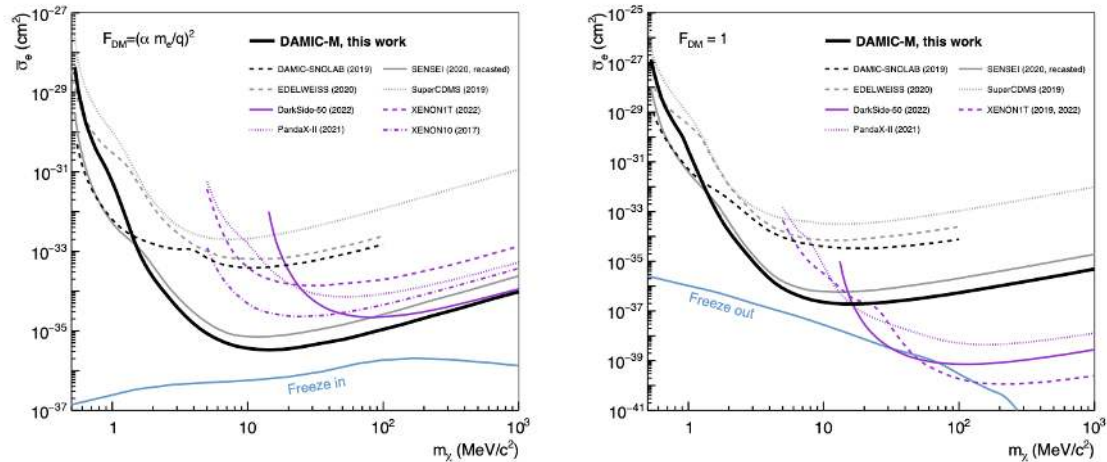
En 2018 la collaboration DarkSide a annoncé de nouveaux résultats qui, en se basant seulement sur l'observation du signal de ionisation dans la chambre à projection temporelle remplie d'Argon Liquide, ont permis d'améliorer d'environ un ordre de grandeur les limites d'exclusion pour les WIMPs dans la région de faible masse (inférieure à 6 GeV/c<sup>2</sup>). Avec les mêmes données, une extension des limites pour les interactions entre WIMP et électrons a également été obtenue.

Ces résultats sont particulièrement prometteurs car ils ont été obtenus avec un volume fiduciel de seulement 20 kg d'Argon et avec un détecteur qui n'avait pas été conçu pour étudier ce domaine de masse. Le groupe DarkSide du LPNHE, qui à l'époque était composé par un chercheur et une étudiante, a contribué de façon significative au développement de l'analyse et à la caractérisation de la réponse de l'Argon liquide à ces énergies. Pour cette caractérisation, les données de l'expérience ARIS@IPNO dans laquelle le LPNHE a joué un rôle moteur ont été aussi fondamentales.

## Premiers résultats de l'expérience DAMIC-M

First Constraints from DAMIC-M on Sub-GeV Dark-Matter Particles Interacting with Electrons.

<https://arxiv.org/abs/2302.02372>



*Limites à 90% de confiance (en noir) pour les interactions DM-électron avec un médiateur ultra-léger ou ultra-massif. Des prédictions sont en bleu ciel.*

La collaboration DAMIC-M, dont une équipe du LPNHE fait partie, a publié ses premières limites dans le plan masse versus section efficace sur l'existence de matière noire interagissant avec les électrons. Ces résultats sont basés sur l'analyse des données de la chambre bas bruit (Low Background Chamber ou LBC) installée au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) qui est un démonstrateur pour l'expérience DAMIC-M proprement dite.

Avec seulement 85g-jours d'exposition et malgré un bruit de fond d'environ 10 DRU (1 DRU = Differential Rate Unit correspond à un évènement par keV par kilogramme et par jour) ces limites de classe mondiale excluent des régions inexplorées du plan pour les masses comprises entre 1,6 et 1000 MeV/c<sup>2</sup> et entre 1,5 et 15,1 MeV/c<sup>2</sup> pour des interactions avec un médiateur ultra-léger (par rapport à la masse de l'électron) ou ultra-massif respectivement (voir la figure ci-dessous). La LBC utilise des CCD prototypes de DAMIC-M dont l'amplificateur à lecture multiple (skipper amplifier) permet d'obtenir une résolution de la charge des pixels de moins de 0,2 électrons. Cette résolution permet d'abaisser le seuil d'analyse à moins de 2 électrons et d'étudier en détails l'écart de la distribution de charge mesurée à celle prédite par le modèle de bruit de fond, principe de l'analyse publiée. Ces résultats démontrent la pertinence des choix technologiques envisagés pour DAMIC-M qui devrait atteindre une exposition d'environ 365 000 g.jours (1 kg.an) pour quelques dixièmes de DRU de bruit de fond.



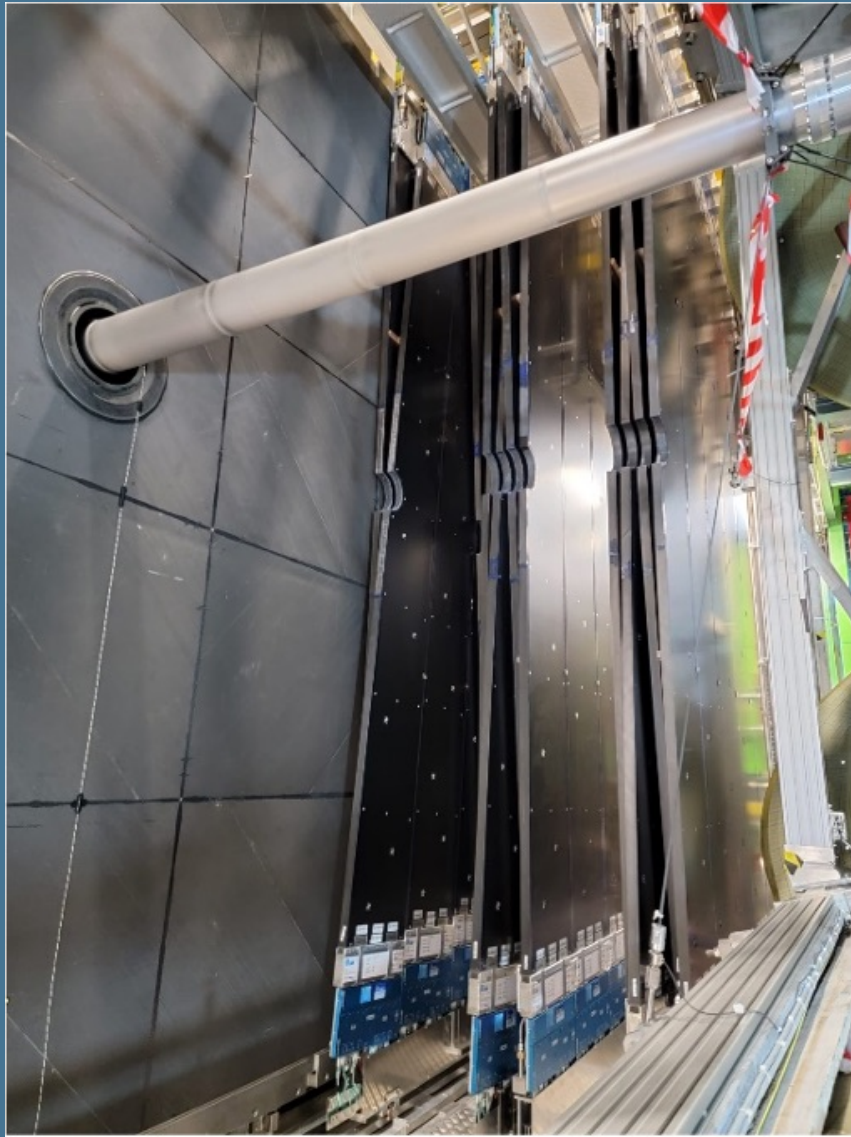
---

## Équipe Asymétrie Matière / Antimatière »

---

Le groupe neutrinos du LPNHE travaille sur le programme japonais des oscillations des neutrinos qui inclut l'expérience en cours T2K et celle future, Hyper-Kamiokande. Dans ce cadre le groupe contribue à l'analyse de T2K, il a proposé le système de distribution d'horloge pour HK, contribution qui a été acceptée par la collaboration et il contribue à l'*upgrade* du détecteur proche de T2K qui sera aussi utilisé par HK, et à la prédiction des flux de neutrinos pour T2K (et HK) avec l'expérience NA61 au CERN.

Le groupe LHCb du LPNHE est fortement impliqué à la fois dans les analyses de physique et les aspects techniques de l'expérience. Les analyses de physique portent essentiellement sur deux axes : l'étude de l'universalité et de la violation de la saveur leptonique, utilisant essentiellement des désintégrations semi-leptoniques du type  $b \rightarrow s\ell^+\ell'^{-}$  ( $\ell'^{\pm}$  = lepton chargé) et  $b \rightarrow c\ell^-\nu$ , et l'étude des désintégrations du méson B en états finals sans particule charmée. Ces deux thèmes ont comme but la recherche de nouvelle physique. Le premier est un sujet actuel phare de la physique des saveurs en général et de l'expérience LHCb en particulier. Le deuxième s'effectue en plusieurs phases de complexité croissante, sur de nombreuses années, donnant l'accès à de plus en plus d'observables. Les aspects techniques de l'implication du groupe, pour les upgrades de LHCb, sont autour de l'électronique de lecture du trajectographe à fibres scintillantes (SciFi) de l'upgrade de phase 1 et dans le projet d'analyse en temps réel (Real Time Analysis, ou RTA), pour les upgrades de phase 1 et 2. Le SciFi (voir portfolio du service électronique) et le système RTA sont déjà installés et dans un état de fonctionnement.



---

## Vers la découverte de la violation de CP dans le secteur leptonique

---

Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations,

Nature 580 (2020) 7803, 339-344,

Nature 583 (2020) 7814, E16 (erratum).

<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2177-0>

<https://arxiv.org/abs/1910.03887>



La recherche de la possible violation de Charge-Parité (CP) dans le secteur leptonique est probablement la question qui va préoccuper le domaine de la physique des neutrinos dans la prochaine décennie. L'observation de la violation de CP avec les neutrinos pourrait, en effet, expliquer pourquoi l'Univers est dominé par la matière alors que les lois de la physique sont symétriques entre matière et antimatière. En 2020, T2K a publié dans Nature des premières indications que CP pourrait être violé dans le secteur leptonique. Ces indications, même si préliminaires et pas encore assez significatives, ont fait la une du journal Nature et seront poursuivies pendant la deuxième phase de l'expérience T2K et avec Hyper-Kamiokande plus tard. Le groupe du LPNHE a travaillé de façon significative pour obtenir ces résultats, en assurant la coordination du groupe de l'analyse d'oscillation ainsi que grâce à des étudiants en thèse qui ont travaillé sur les analyses d'oscillations, les prévisions de flux de neutrinos dans T2K et sur les mesures au détecteur proche au cours des années. De plus, les collaborations T2K, Super-Kamiokande et NOvA sont en cours de préparation des analyses combinées entre leurs résultats sur les oscillations des neutrinos afin d'améliorer les contraintes obtenues individuellement ; ce travail est soutenu par le groupe du LPNHE, notamment à travers l'ANR SUNCORE obtenue par l'un de ses membres.

---

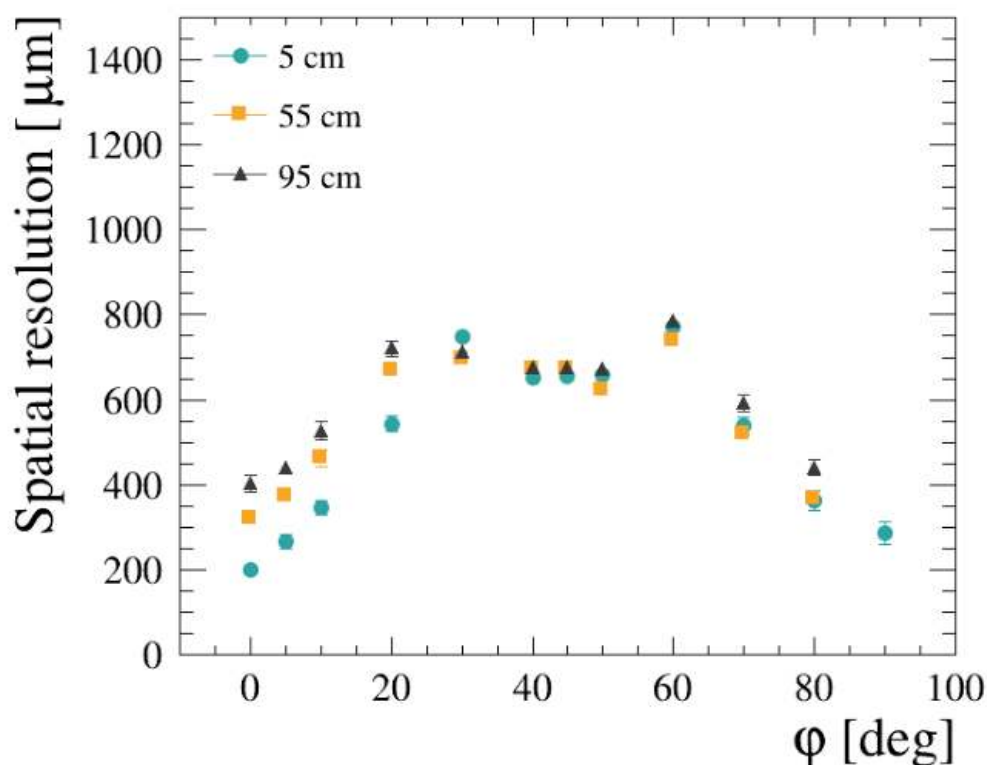
## Nouvelles chambre à projection temporelle pour la mise à niveau du détecteur proche de T2K

---

Characterization of resistive Micromegas detectors for the upgrade of the T2K Near Detector Time Projection Chambers, Nucl.Instrum.Meth.A 1025 (2022) 166109

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900221010111>

<https://arxiv.org/abs/2106.12634>



*Résolution spatiale en fonction de l'angle de la trace sur le plan des MicroMegas observé pendant le test beam a DESY*

Dans le cadre de l'*upgrade* du détecteur proche de T2K, le groupe Neutrinos a fortement contribué à la construction des nouvelles chambres à projection temporelle (TPC) instrumentées avec des micromegas résistif. Durant ces dernières années nous avons participé à trois expériences de tests sous faisceaux (1 au CERN, 2 à DESY, Hambourg) qui ont donné lieu à 3 publications avec comme auteurs principaux les postdocs et les étudiants du groupe. Ces tests ont permis de valider le design des détecteurs Micromegas résistifs (ERAM) et de s'assurer que les performances des nouvelles TPC seront à la hauteur des nécessités de l'expérience.

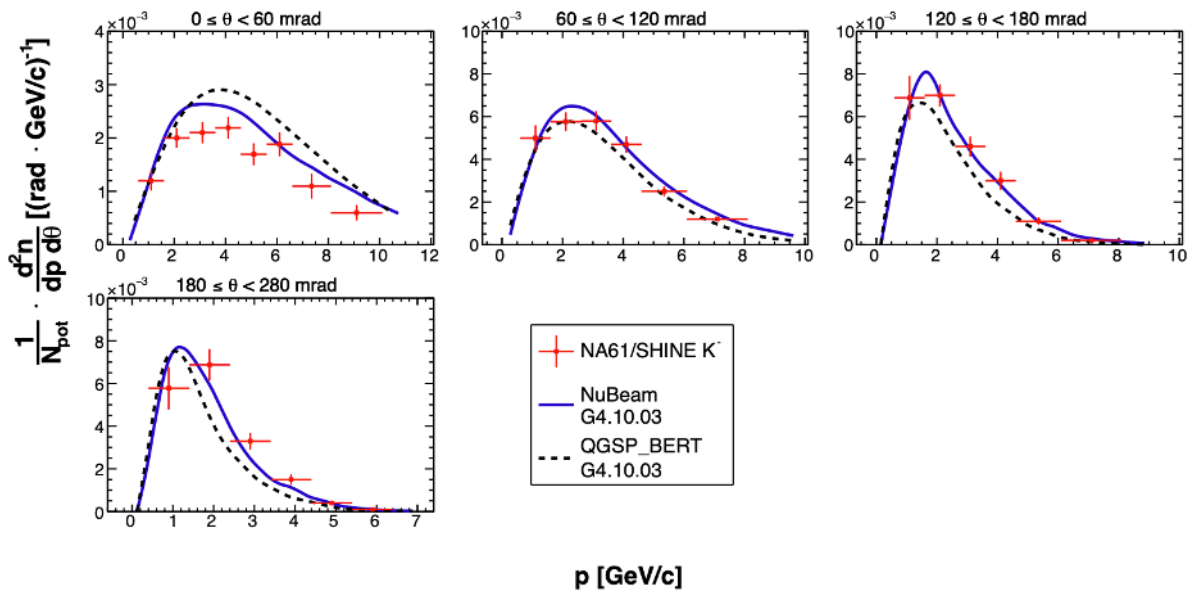


## Mesures de la production de hadrons pour une prédiction précise des flux de (anti)neutrinos

Measurements of  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  and proton double differential yields from the surface of the T2K replica target for incoming 31 GeV/c protons with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS, Eur.Phys.J.C 79 (2019) 2, 100.

<https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-019-6583-0>

<https://arxiv.org/abs/1808.04927>



*Mesures de la production doublement différentielle de kaons chargés négativement pour la cinquième tranche longitudinale ( $72 < z < 90 \text{ cm}$ ) de la cible réplique T2K. Les prédictions de la simulation par GEANT4 (les listes de physique NuBeam et QGS\_BERT) sont superposées aux données de NA61/SHINE.*

Cet article a été préparé et publié sous la responsabilité du groupe LPNHE-Neutrino. Il est basé sur l'analyse décrite dans la thèse de doctorat de Matej Pavin (LPNHE) consacrée aux mesures de la production de hadrons à la surface de la cible réplique T2K avec des protons incidents de 31 GeV/c à l'aide du spectromètre NA61/SHINE au CERN. La production de  $K^\pm$  et de protons a été mesurée pour la première fois, voir la figure à titre d'exemple. Les résultats de cette analyse jouent un rôle crucial dans la réduction des incertitudes sur le flux de (anti)neutrinos dans les expériences T2K et HK.

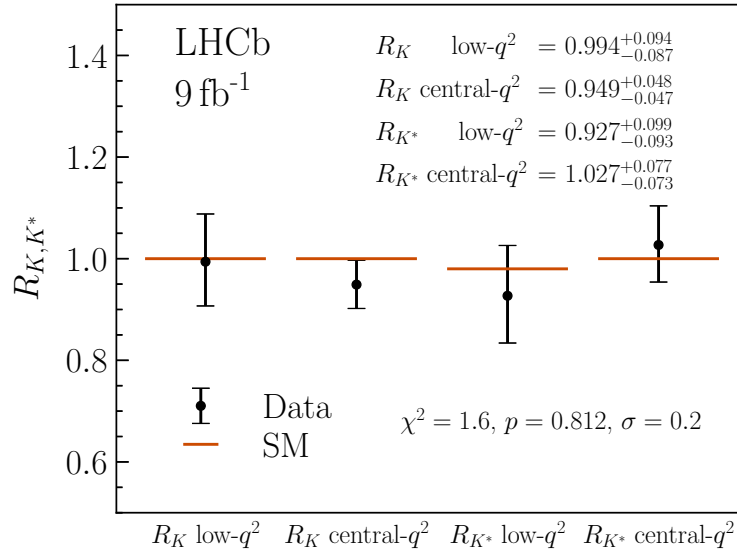
## Test de l'universalité de la saveur leptonique dans les désintégrations

### $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$

Test of lepton universality in  $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$  decays. LHCb collaboration (envoyé à publication dans PRL).

<https://inspirehep.net/literature/2615983>

<https://arxiv.org/abs/2212.09152>



*Résultats présentés compatibles avec les prédictions du modèle standard.*

De nouveaux tests de l'universalité leptonique ont été récemment présentés par LHCb, avec une contribution majeure du groupe du LPNHE. Il s'agit de nouvelles mesures simultanées des rapports  $R_K$  et  $R_{K^*}$ . L'observable  $R_K$  ( $R_{K^*}$ ) est définie comme le rapport entre les rapports de branchement du méson  $B^+$  ( $B^0$ ) en  $K^{+(*0)} \mu^+ \mu^-$  et en  $K^{+(*0)} e^+ e^-$ . Les mesures ont été effectuées avec toutes les données enregistrées par LHCb entre 2011 et 2018 (Runs 1 et 2). Ces rapports testent l'universalité leptonique, dans les transitions  $b \rightarrow s$ , qui est prédite par le modèle standard. Ces mesures sont effectuées dans deux intervalles de  $q^2$  : la masse invariante au carré des deux leptons dans l'état final, notées low- $q^2$  ( $0,1 < q^2 < 1,1 \text{ GeV}^2$ ), et central- $q^2$  ( $1,1 < q^2 < 6,0 \text{ GeV}^2$ ).

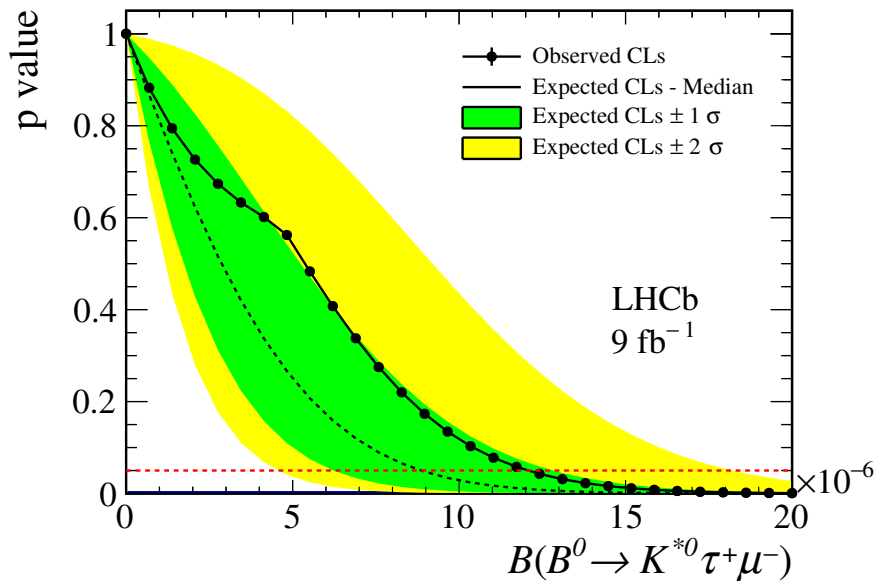
## Recherche de violation de la saveur leptonique avec les désintégrations



Search for the lepton-flavour violating decays  $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^\pm \mu^\mp$ . LHCb collaboration (envoyé à publication dans JHEP).

<https://arxiv.org/abs/2209.09846>

<https://inspirehep.net/literature/2154229>



*p-values attendus et observés, dérivés avec la méthode CL<sub>s</sub>, en fonction des rapports de branchement  $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^\pm \mu^\mp$ . La ligne rouge correspond à la limite à 95% de niveau de confiance.*

Cette étude, conduite entièrement par le groupe du LPNHE, est une première recherche des désintégrations  $B^0 \rightarrow K^{*0} \tau^\pm \mu^\mp$  violant la saveur leptonique. De même que pour le précédent papier de ce portfolio, l'analyse a été effectuée avec l'échantillon complet de 9 fb<sup>-1</sup> des données enregistrées par LHCb entre 2011 et 2018. Comme aucun signal significatif n'a été observé, des limites supérieures sur les rapports de branchement ont été déterminées. Elles constituent les limites supérieures les plus contraignantes jamais obtenues sur le taux d'une hypothétique transition  $b \rightarrow s \tau \mu$ .

---

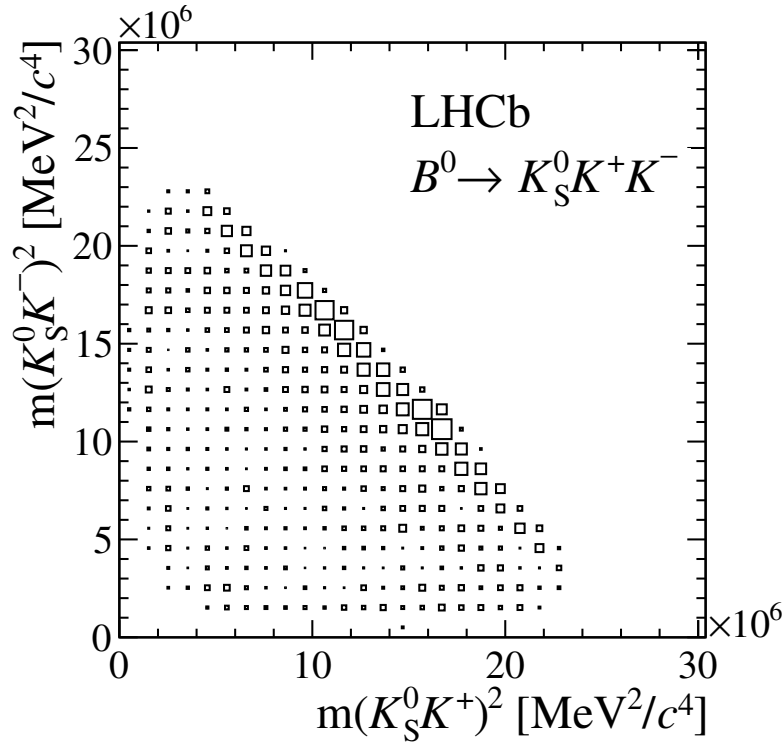
## Mise à jour de la mesure des rapports de branchement des désintégrations $B_{(s)}^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h'^-$

---

Updated branching fraction measurements of  $B_{(s)}^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h'^-$  decays LHCb collaboration, JHEP 11 (2017).

<https://arxiv.org/abs/1707.01665>

<https://inspirehep.net/literature/1608881>



*Distribution sPlot du signal  $B^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$  sur le plan de Dalitz avec  $3 \text{ fb}^{-1}$  de données.*

Depuis plus de 10 ans, le groupe du LPNHE est fortement impliqué dans l'étude des désintégrations  $B_{(s)}^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h'^-$ , où  $h$  est un pion ou un kaon, visant dans un premier temps des mesures de rapports de branchement, et dans un deuxième temps des analyses en amplitudes et des recherches d'asymétrie CP. Cette publication, qui utilise les  $3 \text{ fb}^{-1}$  de données enregistrées par LHCb en 2011-2012, contient la mesure de 5 modes de désintégration parmi 6, dont les rapports de branchement sont mesurés par rapport à celui du canal  $B_{(s)}^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ .

Deux d'entre elles correspondent à des désintégrations du  $B_s^0$  qui n'ont pas pu être produits par les usines à B. Le groupe est en train de finaliser une mise à jour de cette analyse, avec l'ensemble des  $9 \text{ fb}^{-1}$  des données disponibles, qui devrait normalement fournir une mesure du rapport de branchement manquant du canal  $B_s^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$ . Cette étude pose les bases nécessaires pour les analyses en amplitude des différents modes, qui suivront. Nous avons par ailleurs démarré l'une des analyses en amplitude, celle de  $B^0 \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$ .



---

## Allen : Un système de déclenchement de haut niveau sur GPU pour LHCb

---

Allen : A high level trigger on GPUs for LHCb. R. Aaij et al., *Comput.Softw.Big Sci.* 4 (2020) 1, 7.

<https://arxiv.org/abs/1912.09161>

<https://inspirehep.net/literature/1771853>



*Photo prise au CERN le 31 octobre 2021 lors de la première prise de données avec le trigger GPU avec les faisceaux test.*

En 2020, la collaboration LHCb a adopté le projet pionnier Allen - un nouveau système de déclenchement entièrement basé sur des GPU - pour l'analyse des données de l'expérience, en temps réel, au rythme du croisement des faisceaux du LHC (30 MHz). Ce travail fait partie du projet Real Time Analysis, ou RTA, de LHCb. Le projet très innovant a été initié par le groupe du LPNHE, qui a aussi joué un rôle majeur dans sa réalisation. Le défi de ce projet est de traiter 4 téraoctets de données par seconde avec environ 200 GPU, de reconstruire les trajectoires des particules chargées à 30 MHz et de prendre des décisions pour conserver ou supprimer des événements en fonction de leurs propriétés. En octobre 2022, les chercheurs du LPNHE ont fait un grand pas vers cet objectif ; ils ont réussi à reconstruire, pour la première fois avec le nouveau détecteur LHCb, les trajectoires des particules chargées, à prendre des décisions de déclenchement basées sur leurs propriétés, et tout cela à 20 MHz. Bien que le système n'ait pas encore fonctionné à sa capacité maximale et qu'il reste encore du travail pour arriver à ce but, c'est la première fois qu'un système de déclenchement d'une expérience de physique des particules effectue la trajectographie à un tel débit. Le groupe se concentre désormais sur la compréhension et l'amélioration, à la fois de la qualité des trajectoires observées et des performances d'Allen, en vue de prendre des données à pleine capacité en 2023.



---

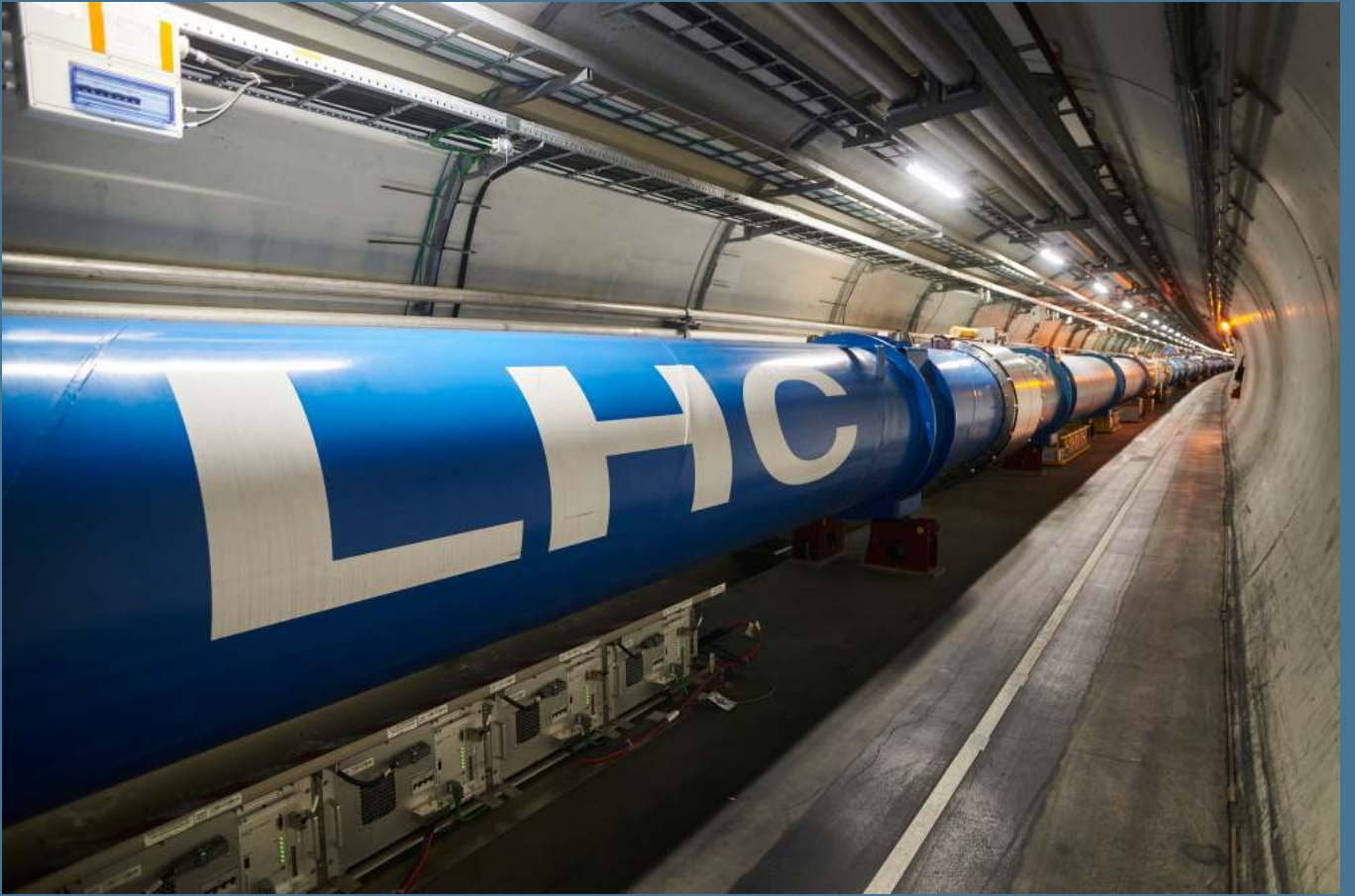
## Équipe « Masses et Interactions Fondamentales »

---

Les activités du groupe Masse et Interactions Fondamentales sont à l'avant-garde de l'exploration de la frontière de la haute énergie. Les mesures en cours, menées notamment par les équipes du groupe ATLAS continuent d'affiner notre connaissance du boson de Higgs et des interactions des particules du Modèle Standard, la recherche de signaux expérimentaux non décrits par celui-ci et la recherche directe de nouvelles particules. Ce programme de physique s'accompagne d'études des performances du détecteur ATLAS, cruciales pour assurer la robustesse des mesures expérimentales.

Une jouvence majeure du détecteur ATLAS est en cours pour le préparer à une nouvelle phase de haute luminosité de LHC, qui devrait s'étendre jusqu'à la fin des années 2030. Un nouveau détecteur de vertex appelé ITk est en construction, avec une participation importante du laboratoire. C'est un projet majeur pour le laboratoire en terme de mise en œuvre des connaissances scientifiques et techniques et d'implication des ressources humaines. Un deuxième projet, HGTD, vise à l'amélioration des performances du calorimètre, notamment en permettant de rejeter les particules provenant d'interactions parasites. La réussite de ces deux projets permettra aux étudiants, aux postdoctorants et aux jeunes chercheurs de se former aux techniques les plus performantes et constituera une forte contribution à une expérience ainsi renouvelée.

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



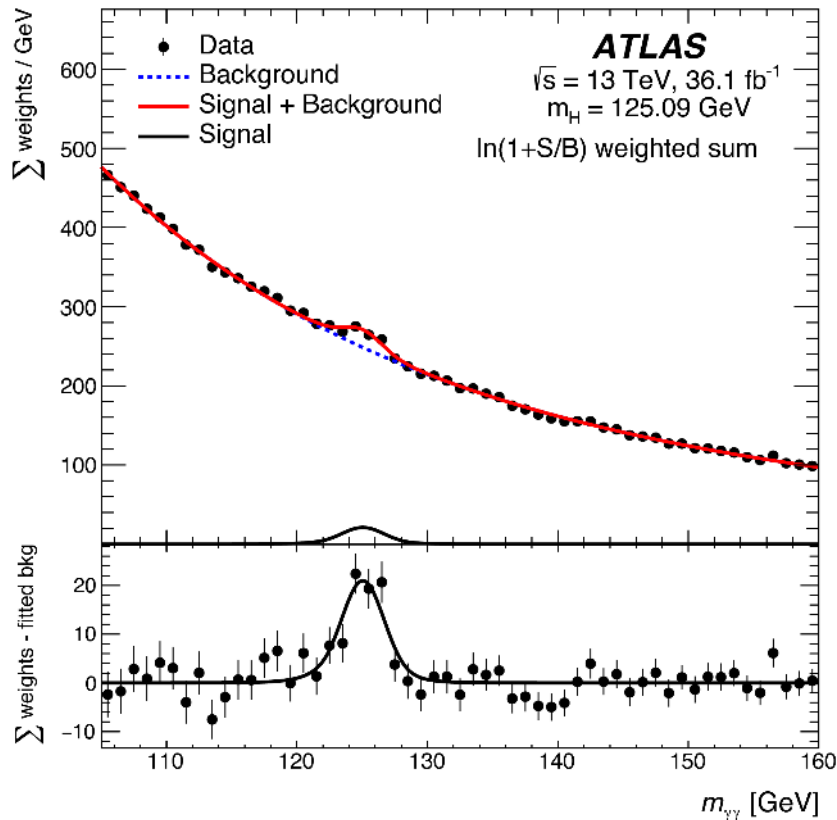


## Propriétés du boson de Higgs dans le canal de désintégration diphotons

Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with  $36\text{fb}^{-1}$  of pp collision data at  $\sqrt{s}=13\text{TeV}$  with the ATLAS detector, The ATLAS Collaboration, Phys. Rev. D 98, 052005 (2018)

<https://inspirehep.net/literature/1654582>

<https://hal.science/hal-01862009>



*Distribution de la masse invariante diphoton observée dans les données ATLAS 2015-2016 à 13 TeV.*

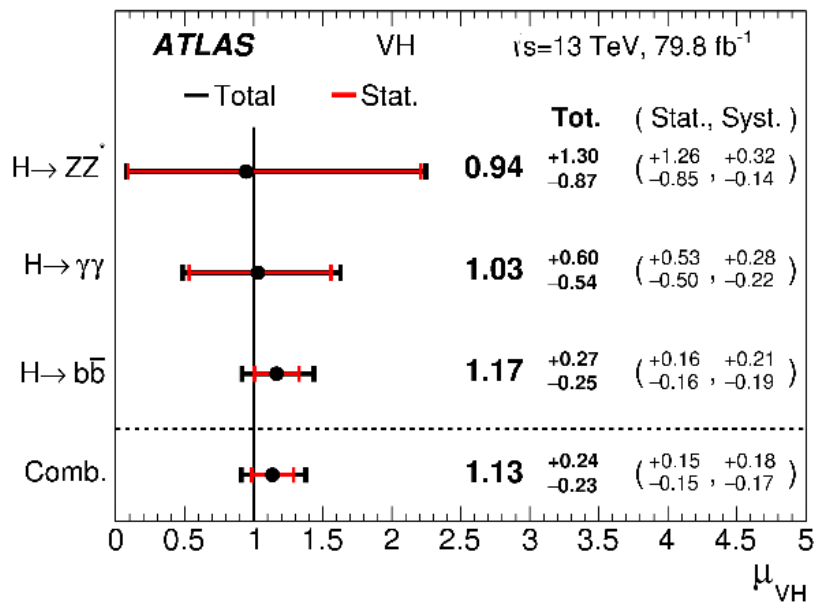
Depuis sa découverte en 2012, des avancées importantes ont permis d'établir avec certitude la nature scalaire du boson de Higgs, de mesurer sa masse avec une précision au pour-mille et ses couplages aux bosons vecteurs ainsi qu'aux fermions de masses les plus élevées, le tout en accord avec les prédictions du Modèle Standard. Sur cette thématique, le groupe ATLAS a continué l'étude du canal de désintégration  $H\gamma\gamma$ , en paires de photons, qui lui avait déjà permis de participer activement à sa découverte. Ces désintégrations sont rares, avec un rapport d'embranchement de l'ordre de 0,2%, mais relativement facilement identifiables et bien mesurées. Dans ce papier, les premières données du Run 2 du LHC ont été analysées. Une mesure de section efficace de production a été faite et comparée aux différents modes de production prédits par le MS. Le rapport entre le nombre d'événements observé et attendu est mesuré à  $0,99 \pm 0,14$ , améliorant de près d'un facteur deux la précision obtenue jusque là. La section efficace de production du mode  $H\gamma\gamma$  est mesurée à  $55 \pm 10 \text{ fb}$  en bon accord avec les prédictions du MS. Le groupe a participé à ces analyses ainsi qu'aux études de performance de reconstruction et de calibration des photons et a ensuite diversifié ses études vers la recherche de nouvelle physique à travers la recherche de résonances en deux photons ou de la recherche de matière noire produite.

## Observation de la désintégration $H \rightarrow b\bar{b}$ et de la production VH avec ATLAS

Observation of  $H \rightarrow b\bar{b}$  decays and VH production with the ATLAS detector, The ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 786 (2018).

<https://inspirehep.net/literature/1691634>

<https://hal.science/hal-01871837v1>



Les valeurs ajustées de l'intensité du signal VH pour  $m_H=125$  GeV séparément pour les canaux de désintégration  $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  et  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ , ainsi que leur combinaison.

Le deuxième front de l'étude du boson de Higgs dans le groupe ATLAS concerne l'utilisation du canal de désintégration  $H \rightarrow b\bar{b}$ , en paires de quarks b, qui a un rapport de débranchement d'environ 58% mais souffre d'un niveau de bruit de fond élevé, ce qui a rendu son observation très difficile. La principale méthode pour améliorer le rapport signal sur bruit est de rechercher les événements VH où le boson de Higgs est produit en association avec un boson V (V=W ou Z) se désintégrant en leptons. Dans ce papier, un excès d'événements à 4,9 (4,3) déviations standard est observé (attendu) par rapport aux prédictions de bruit de fond provenant du MS. La combinaison avec les mesures précédentes (Run 1) dans ce même canal de désintégration permet de déclarer une observation directe à plus de cinq déviations standard du boson de Higgs dans le canal  $H \rightarrow b\bar{b}$ . Le groupe a participé à ces analyses ainsi qu'aux études de performance de reconstruction et de calibration des jets, issus de quarks b en particulier. S'appuyant sur cette expertise, le groupe a entamé aussi une recherche de la production conjointe de deux bosons de Higgs pour accéder au paramètre d'auto-couplage du champ de Higgs. Enfin, l'équipe a contribué aux projections pour la phase HL-LHC des mesures des propriétés du boson de Higgs.

---

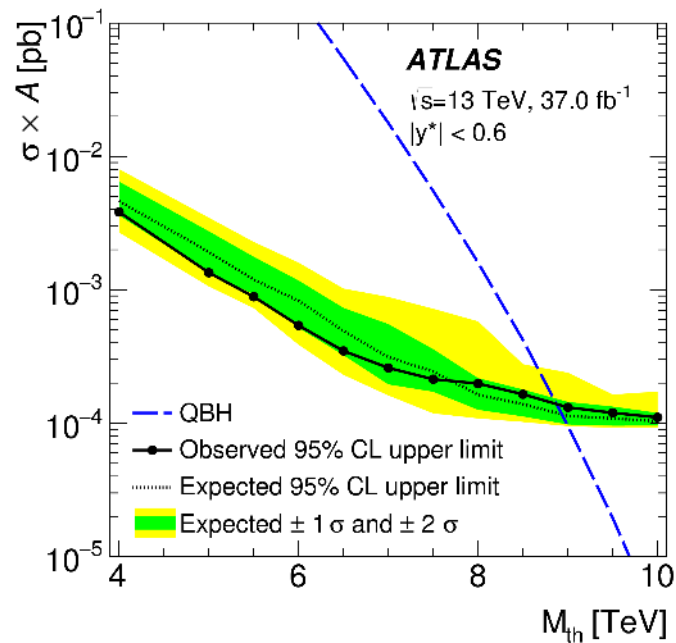
## Recherche de nouveaux phénomènes dans des événements dijets en utilisant $37\text{fb}^{-1}$ de données de collision pp collectées à $s=13\text{ TeV}$ avec le détecteur ATLAS

---

Search for new phenomena in dijet events using  $37\text{fb}^{-1}$  of pp collision data collected at  $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$  with the ATLAS detector, The ATLAS Collaboration, Phys. Rev. D 96 (2017) 052004.

<https://inspirehep.net/literature/1519428>

<https://hal.science/hal-03999307v1>



*Limites à 95% de CL obtenues à partir de la distribution de masse invariante dijets sur la section efficace de production de nouvelles particules en fonction de leurs masses (ici mini trous noirs).*

Le groupe ATLAS est impliqué depuis de nombreuses années dans des études de précision du MS effectuées à travers des mesures de sections efficaces inclusives de jets et de paires de jets, qu'ils soient légers ou provenant de quarks b. Le programme de recherche de nouvelle physique au-delà du MS utilise ces mêmes événements. L'article présenté ici est une étude faite avec des événements dijets sur une partie des données du Run 2. Les distributions de masse invariante et angulaires sont comparées aux prédictions provenant des simulations de processus connus du MS, et aucune déviation significative n'a été observée. Le lot de données est alors utilisé pour établir des limites supérieures, à 95% de niveau de confiance sur différents scénarios de nouvelle physique. Ces résultats ont représenté une amélioration significative des résultats obtenus précédemment. Le groupe a continué à travailler sur ce type de mesures, aussi bien sur l'analyse et l'interprétation que sur les études de performance de la reconstruction et de l'étalonnage des jets.

---

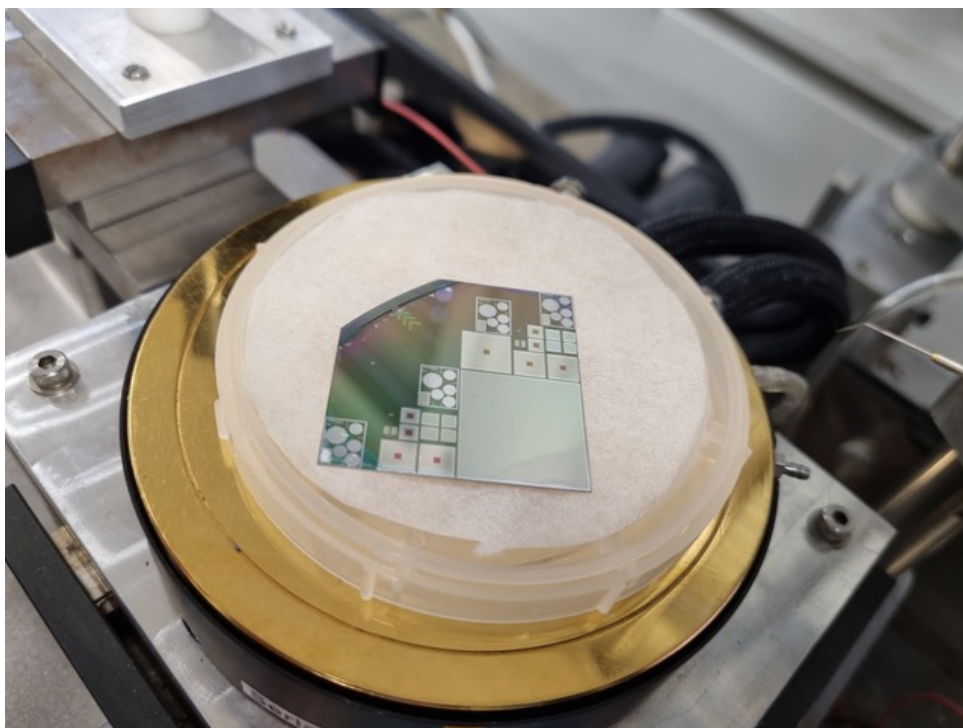
## Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector

---

Technical Design Report for the ATLAS Inner Tracker Pixel Detector, The ATLAS Collaboration, CERN-LHCC-2017-021 ; ATLAS-TDR-030 (2017)

<https://inspirehep.net/literature/2091130>

<https://hal.science/hal-03978880>



*Morceau de wafer de production des capteurs pixel pour l'ITk d'ATLAS, produit par FBK Trento sur un dessin réalisé en collaboration avec l'équipe ATLAS du LPNHE. Le détail montre un groupe de structures de test et un capteur individuel, utilisé pour caractérisation après irradiation. Crédit G. Calderini.*

Une intense activité de R&D est en cours pour la conception et la construction du détecteur de traces d'ATLAS (Inner Tracker, ITk) pour la phase de haute luminosité du LHC (HL-LHC) qui débutera en 2029. Le LHC pourra atteindre une luminosité instantanée de  $7,5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , avec une moyenne de 200 collisions inélastiques proton-proton (on parle alors d'empilement) par croisement de faisceau. L'ITk sera opérationnel pendant une dizaine d'années, temps durant lequel ATLAS accumulera un lot de donnée équivalent à  $4000 \text{ fb}^{-1}$ , soit environ vingt fois celui accumulé à ce jour. Le « Technical Design Report » de l'ITk a été approuvé en 2018. L'activité principale au laboratoire est centrée sur le développement des capteurs à pixels en silicium et la construction des modules qui feront partie du nouveau détecteur. Le groupe ATLAS de l' LPNHE a dessiné les senseurs à pixels produits par une des fonderies qui participent à la production et a participé à la validation des différents producteurs au travers des campagnes de mesures, des irradiations et de tests en faisceaux. La construction en France des modules de l'ITk sera faite dans le cadre d'un regroupement parisien avec le LPNHE, l'IJCLab et le CEA/Irfu. L'infrastructure du laboratoire a été renforcée en vue de cette construction. Le groupe du LPNHE est aussi impliqué dans le dessin de la puce de lecture des modules à pixels par la Collaboration RD53.

---

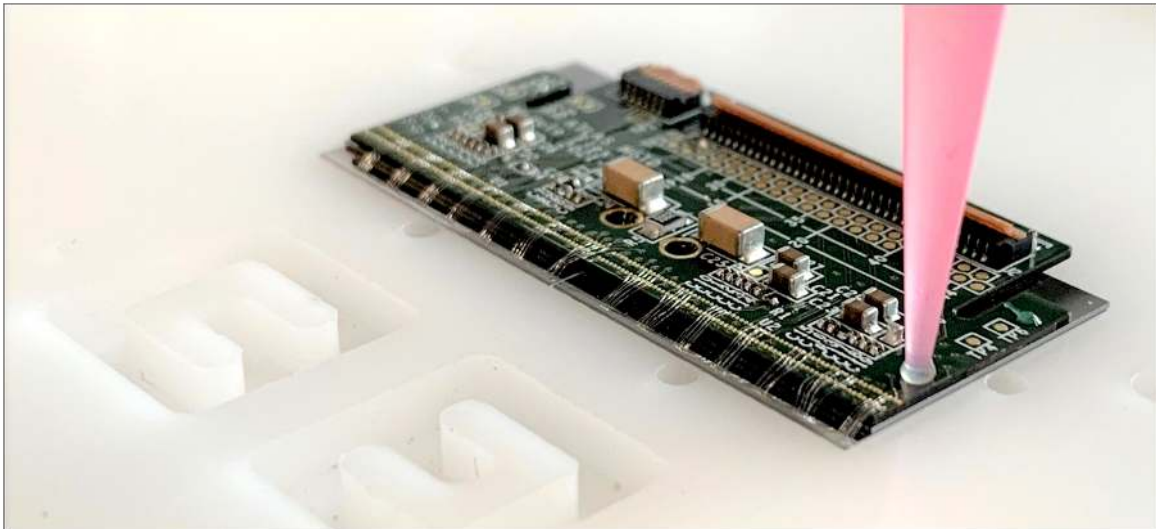
## Technical Design Report : A High-Granularity Timing Detector

---

Technical Design Report : A High-Granularity Timing Detector for the ATLAS Phase-II Upgrade, The ATLAS Collaboration, CERN-LHCC-2020-007 ; ATLAS-TDR-031 (2020).

<https://inspirehep.net/literature/2091129>

<https://hal.science/hal-03978531>



*Les modules de détection de HGTD sont constitués de l'empilement d'un ASIC de lecture, d'un LGAD pour la détection et d'un flex qui permettra la connexion à l'électronique extérieure. Le module est ici placé sur une plaque de dépression pour collage. Crédit LPNHE.*

La grande augmentation de l'empilement est l'un des grands défis de la phase de haute luminosité du LHC. Une nouvelle façon de combattre cet effet est d'utiliser des informations temporelles de haute précision de manière à distinguer les collisions proches spatialement mais bien séparées en temps. Le détecteur HGTD (High-Granularity Timing Detector), sera un nouveau sous-détecteur hautement granulaire permettant une mesure précise en temps du passage de traces de particules chargées. Il couvrira la région en pseudo-rapacité entre 2,4 et 4,0, complétant les performances du détecteur de traces ITk dans la région à l'avant et permettant au final un gain dans la reconstruction combinée des détecteurs. La résolution en temps par trace, pour des particules au minimum d'ionisation, sera de 30 ps au début de la prise de données. L'équipe ATLAS du LPNHE est fortement impliquée dans ce projet, approuvé par la collaboration en 2020, en particulier dans les tests en faisceau (à DESY ou au CERN) de prototypes, les études de simulations et de performances de la reconstruction des traces. C'est au niveau mécanique qu'une partie importante des forces du groupe HGTD du laboratoire se situe : structure et dessin des unités de détection composées de modules, choix des matériaux, collages et montage des premiers démonstrateurs.

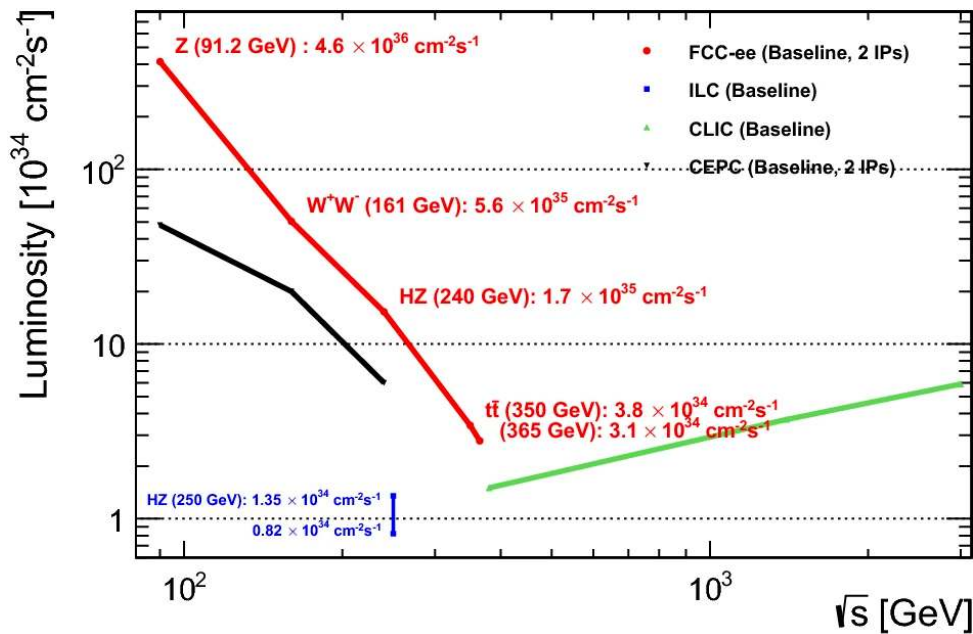


## Revue de FCC-ee : de nouvelles opportunités offrent de nouveaux défis

FCC-ee overview : new opportunities create new challenges, A. Blondel and P. Janot. Eur.Phys.J.Plus 137 (2022) 1, 92.

<https://inspirehep.net/literature/1870513>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03285125>



Luminosité attendue par défaut du FCC-ee en fonction de l'énergie dans le centre de masse des collisions.

Pour l'horizon 2025 et au-delà, la Stratégie Européenne en Physique des Particules de 2020 a mis en avant la physique du boson de Higgs comme priorité et le développement d'une nouvelle machine qui permettra d'effectuer des mesures dix fois plus précises qu'actuellement. Le Future Circular Collider (FCC) représente la vision à long terme pour atteindre ce but scientifique. Dans une approche en deux phases, un tunnel circulaire de 100 km au CERN permettrait d'opérer tout d'abord un collisionneur e+e-, le projet FCC-ee, en tant qu'usine à Higgs, puis ensuite vers 2060, un collisionneur hadronique à 100 TeV, le FCC-hh. Ce papier présente une revue du projet FCC-ee. Avec sa grande luminosité, ses conditions expérimentales propres et une gamme en énergie couvrant la production des quatre particules les plus massives connues, FCC-ee offre un vaste potentiel d'études et un grand potentiel de découverte. L'un des principaux défis est maintenant de définir les systèmes expérimentaux qui exploiteront pleinement toutes les possibilités offertes par cette machine. L'activité du groupe se concentre sur les études de faisabilité de canaux de physique, visant à optimiser le design des futurs détecteurs, plus précisément, dans la phase e+e-, la détermination précise de la constante de couplage de l'interaction forte via l'étude de la multiplicité des jets hadroniques produits, ainsi que ses conséquences sur le calorimètre, en termes de résolution en énergie et granularité.

---

## Services techniques

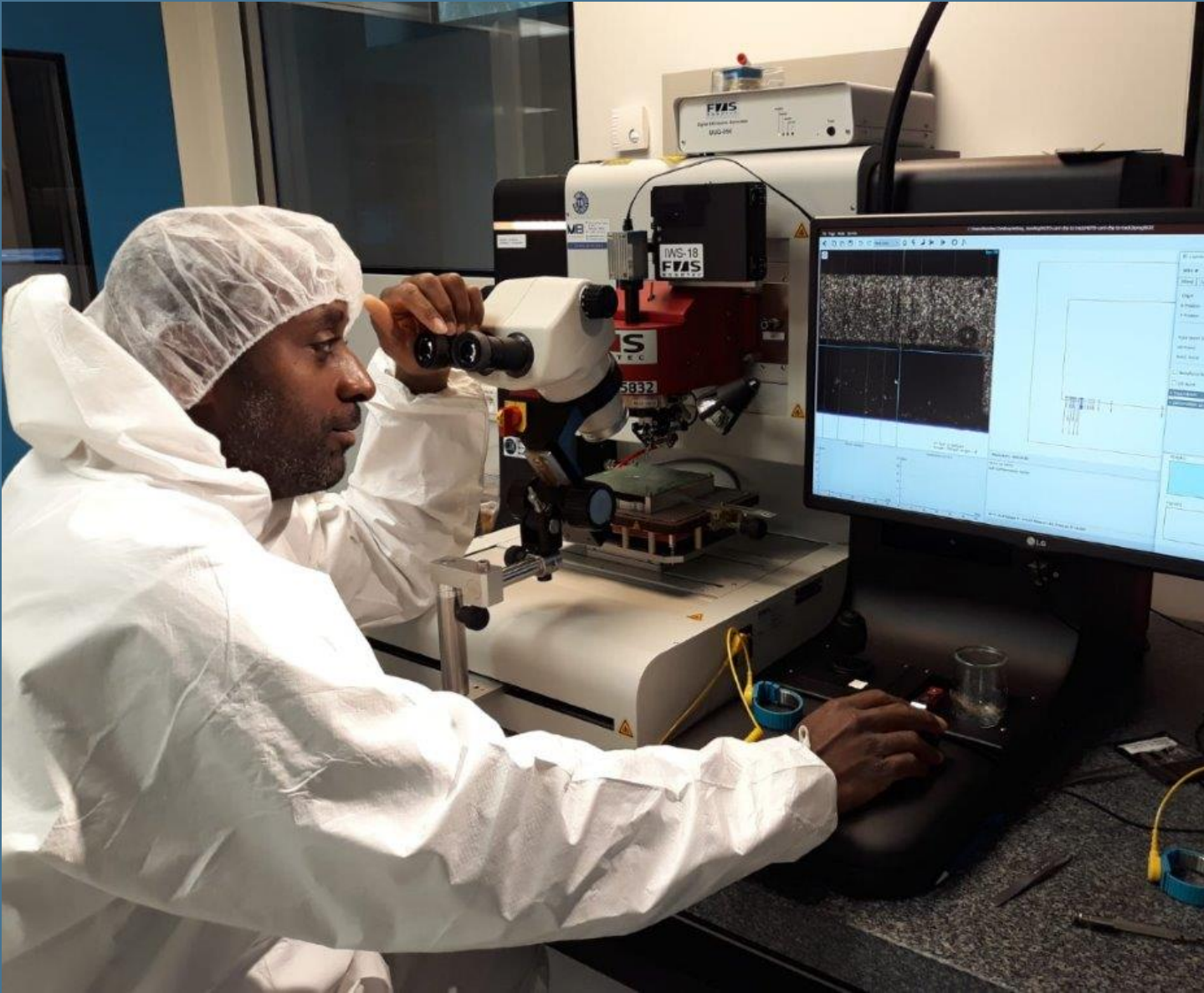
---

Les activités d'ingénierie des services techniques couvrent trois domaines métier principaux : électronique, informatique et mécanique. Elles permettent aux équipes scientifiques du laboratoire de proposer des contributions significatives qui sont conduites depuis les explorations préliminaires jusqu'aux étapes de construction et de réception. Les réalisations, que ce soit pour les R&D ou la production, font appel à nos réseaux de partenaires académiques et de sous traitants du secteur industriel. Pour les étapes de mise au point des prototypes, le laboratoire dispose d'ateliers électroniques et mécaniques équipés pour répondre aux besoins d'ajustements avec une faible latence. Le support fourni par les pôles d'administration système et réseau et les services généraux assure une autonomie appréciable pour la conduite des activités.

Le laboratoire dispose par ailleurs d'installations expérimentales pouvant répondre à une variété de besoins : hall de montage à empoussièrement contrôlé pour les dispositifs de grande dimensions, salles blanches et divers espaces expérimentaux dédiés ainsi qu'une salle informatique pour le calcul scientifique.

Les locaux accueillent des appareillages de dernière génération pour les mesures électroniques (oscilloscopes, machines de test sous pointes, machine à bonder), pour la métrologie mécanique (machines de mesure tridimensionnelle optique et conventionnelle, microscope 3D), pour l'instrumentation (cryostats, alimentation directe en azote liquide, lasers picoseconde, électromètres...).

Le portfolio présente quelques contributions emblématiques des capacités des équipes techniques. D'autres contributions sont aussi incluses dans les portfolios associés aux équipes scientifiques. En effet les R&D, études et travaux de réalisation s'opèrent de façon étroitement coordonnée entre les équipes techniques et les équipes scientifiques ce qui garantit un niveau de performance et d'excellence.



---

## Le Carrousel de filtre pour « Rubin Observatory LSST Camera »

---

Design, assembly and validation of the Filter Exchange System of LSSTCam, Proc. SPIE 12182, Ground-based and Airborne Telescopes IX, 121823A (29 August 2022)

<https://doi.org/10.1117/12.2629336>



*Le carrousel lors de son emballage dans le hall de test du LPNHE, en vue de son expédition aux US en 2019. Crédit Pierre Antilogus.*

Pour quantifier les couleurs des objets astronomiques, information clé dans l'estimation de leur distance, les imageurs collectent la lumière à travers des filtres qui sélectionnent une bande du spectre. LSST observera le ciel successivement dans 6 bandes couvrant la fenêtre visible, de 330 à 1045 nm. Le dispositif changeur de filtres permet de déplacer ces filtres (environ 80 cm de diamètre et entre 25 et 38 kg chacun) d'une position d'attente à leur utilisation dans le faisceau et réciproquement. Ces mouvements doivent être rapides (<90 secondes, afin de minimiser les temps morts), précis et fiables (près de 100 000 changements de filtres sont prévus). L'IN2P3 est responsable de la fourniture du système changeur de filtres de LSST et le LPNHE fournit le Carrousel (cf. photo), qui tient les filtres en attente et présente le filtre à positionner dans le plan focal. Le Carrousel, qui pèse 250 kg sans filtre, est un système extrêmement robuste et automatisé, capable de maintenir de façon sûre un total d'environ 155kg de filtres en intégrant les risques sismiques importants du Chili. La construction du changeur de filtres a mobilisé 5 laboratoires de l'IN2P3. Près d'une quinzaine de personnes des services techniques du LPNHE ont ainsi participé à ce projet depuis 2007. A l'automne 2019, le changeur de filtres a été livré à SLAC en Californie pour son intégration dans la caméra de LSST. Depuis 2020, y compris pendant les deux années fortement perturbées par la pandémie, l'équipe du laboratoire a activement contribué à la mise en service du système et son optimisation à SLAC, que ce soit depuis Paris ou en effectuant des voyages de travail aux US. Le changeur de filtre et son Carrousel sont aujourd'hui parfaitement opérationnels dans la caméra de LSST (ex : changement de filtre en 83 s).



## Électronique du trajectographe SciFi de LHCb

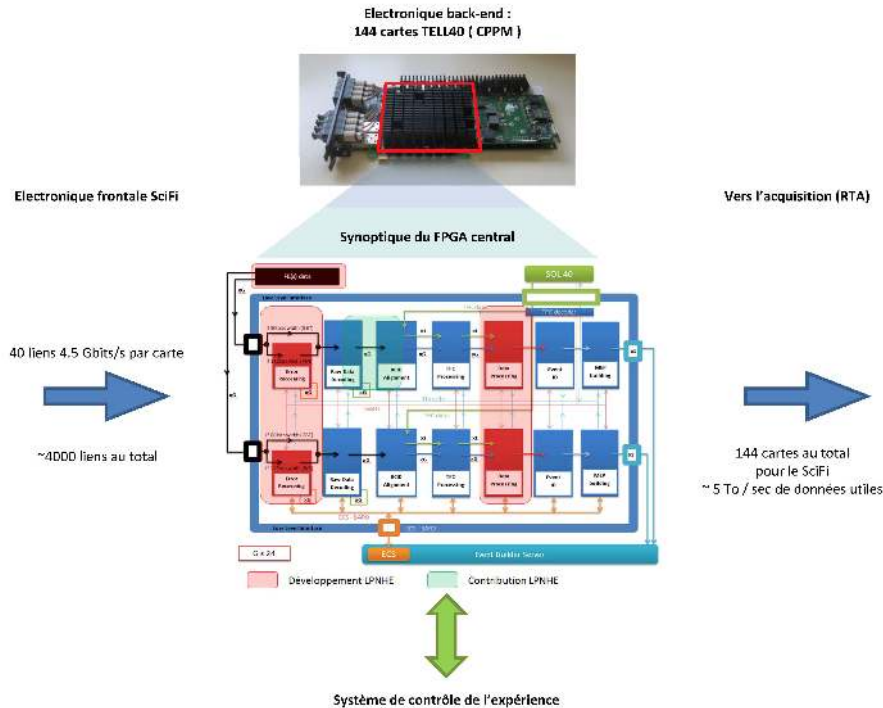


Illustration de la structure du Firmware LHCb. Photo : crédit CPPM. synoptique : crédit LAPP.

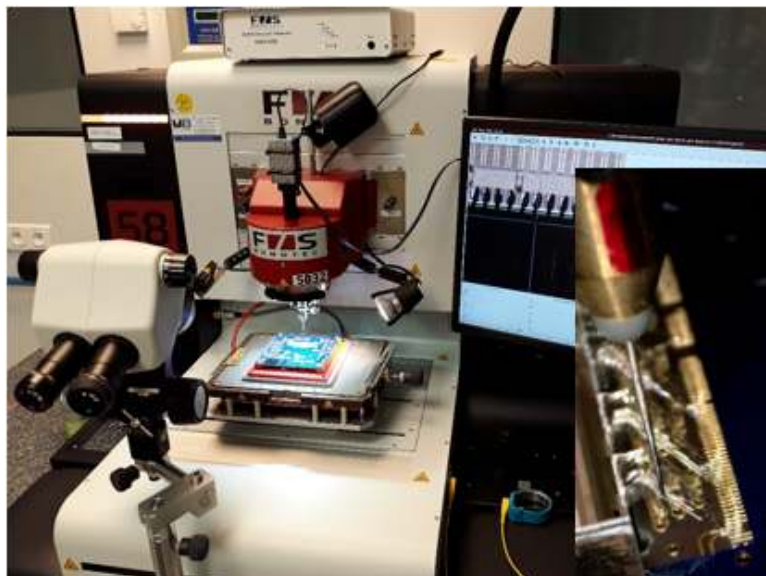
L'expérience LHCb au CERN a fait l'objet, à l'occasion de l'upgrade phase I (2022-2030), de nombreuses améliorations. C'est notamment le cas de l'électronique « back-end » (ou aval), dont le but est de concentrer les données issues de tous les sous-détecteurs et de fabriquer les événements exploités par le système d'acquisition de l'expérience (voir le document portfolio consacré à RTA de l'équipe AMA). Elle repose sur des cartes « PCIe40 », conçues par le CPPM, disposant d'un grand nombre d'entrées optiques rapides (en provenance de l'électronique frontale), d'un circuit FPGA central et d'une interface rapide PCIeexpress reliée à l'acquisition centrale de l'expérience. Le LPNHE a développé les modules de firmware de ce FPGA central spécifiques au sous-détecteur SciFi (trajectographe à fibres scintillantes) dont la fonction première est la lecture des données du front-end en synchronisation avec les signaux de contrôle rapides du système d'acquisition de LHCb et de l'accélérateur. Malgré des contraintes sévères en terme de conception (ressources du FPGA limitées, horloges de 200 à 250 MHz), la conception modulaire et l'optimisation du code en VHDL ont permis d'offrir des fonctions supplémentaires d'étalonnage et de *monitoring* en jouant le rôle d'accélérateur matériel. Des outils d'émulation ont également été intégrés au circuit et ont rendu possible la mise au point du système sur des bancs de test indépendants. La configuration, le contrôle et la surveillance des centaines de cartes back-end imposent l'utilisation d'interfaces dédiées, permettant de gérer massivement et ergonomiquement le sous-système back-end du SciFi, dans l'environnement global. À cet effet, l'équipe du LPNHE a créé des panneaux graphiques et des *scripts* de contrôle qui sont inclus dans l'architecture logicielle de contrôle de l'expérience. Le système a été déployé en 2022 et est en cours de mise en service.



---

## Plateau technique pour le test et l'intégration de détecteurs semi-conducteurs

---



*TiSiDet, crédit LPNHE.*

Le LPNHE dispose d'installations remarquables pour la caractérisation et l'intégration de capteurs ou microcircuit semi-conducteurs. Localisé dans un ensemble de salle blanches de classe jusqu'à ISO6, celui-ci dispose d'une labellisation de l'IN2P3 en tant que plateau technique national « Test et Intégration de détecteurs semi-conducteurs » (TiSiDet) et constitue, pour la partie co-financée par la région Ile-de-France, une plateforme CNRS/Sorbonne Université. Le plateau technique héberge des équipements de dernière génération dont il existe seulement quelques unités sur le territoire national.

- Une machine à bonder semi-automatique BONTEC 5800 acquise en 2019 permet de réaliser des micro câblage avec un pas de 75  $\mu\text{m}$  en technologie « wedge ». Associée à des appareils de vérification métrologiques (machine de micro traction, microscope 3D, mesures tri-dimensionnelles optiques), le laboratoire a pu être labellisé site de production pour ATLAS/ITk. La machine sera prochainement accessoirisée pour le micro câblage en technologie « ball » Deux machines de test sous pointes équipent aussi le plateau dont une FORMFACTOR TESLA200 acquise en 2022. Celle-ci permet la caractérisation de signaux de l'ordre de 10 fA et des mesures de capacités de l'ordre de 10 fC et d'étudier le comportement des échantillons en température entre -55 °C et 200 °C et jusqu'à des tensions de polarisation de 5 kV. Les échantillons peuvent être des puces uniques ou des wafers complets jusqu'à 200mm.
- En complément, un dispositif de traitement des substrats au plasma froid assure une préparation convenable des échantillons pour l'intégration par collage ou par microcâblage.

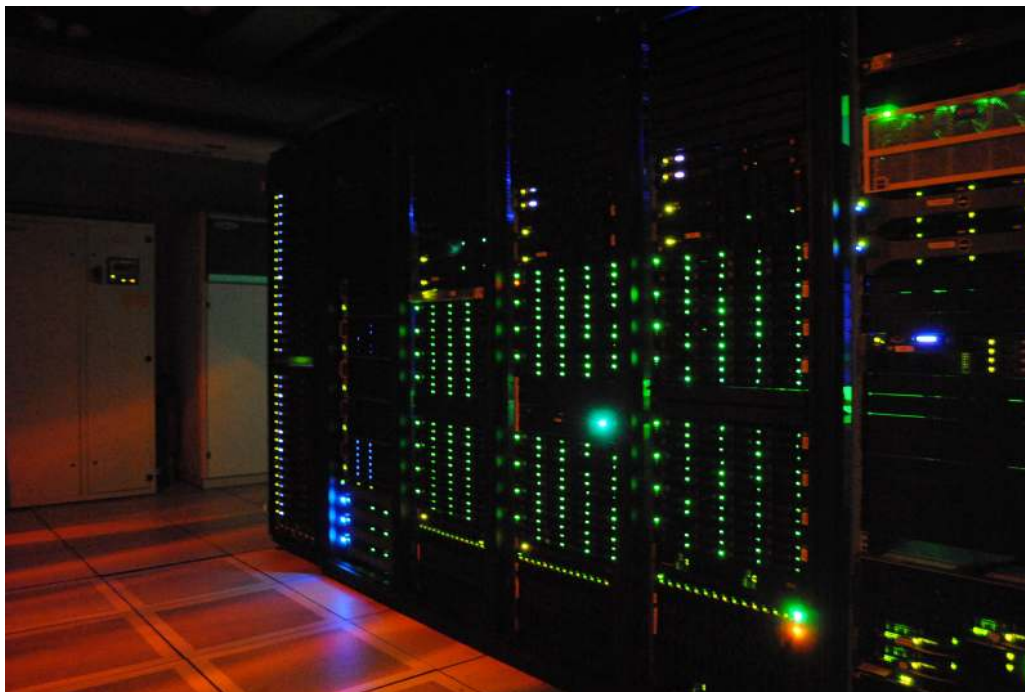
L'opération de ces équipements de premier ordre est assuré par des personnels permanents du laboratoire dont l'expertise permet le positionnement des équipes scientifiques sur des contributions clé de mise au point (détecteur pixels ITk) ou de production.

---

## Plateforme de Calcul et stockage (PCS-LPNHE)

---

<https://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?rubrique492>



*Salles des serveurs informatiques du LPNHE. Crédit Vera Varanda.*

Le LPNHE gère une plateforme de calcul scientifique et de stockage avec les objectifs suivants :

- être un centre de calcul et de stockage majeur (Tier 2) basé sur les technologies de grille de calcul, pour les expériences auprès du LHC au CERN, dans le cadre du projet WLCG (*World LHC Computing Grid*) et de répondre aux besoins des autres expériences tout en préservant une partie des ressources pour un cadre pluridisciplinaire dans le cadre des projets EGI (European Grid Infrastructure) et France Grilles. Cette activité existe dans le cadre de GRIF (« Grille au Service de la Recherche en Ile de France ») depuis 2005. Près de 5000 cœurs de calcul sont disponibles ainsi qu'un espace de stockage de plus de 3 peta-octets.
- être une infrastructure de « cloud computing » basée sur les technologies type Openstack. Cette activité existe au LPNHE depuis 2019 et est en production depuis 2021. Un peu plus de 300 cœurs de calcul sont disponibles
- offrir des capacités de calcul haute performance, en particulier avec quelques cartes GPU.
- offrir des capacités d'hébergement à des matériels informatiques provenant d'autres laboratoires et projets de Sorbonne Université.

Deux ingénieurs du service informatique assurent l'administration et l'exploitation des différentes ressources. Depuis janvier 2023, la plateforme PCS-LPNHE est labellisée comme telle à Sorbonne Université.

---

## Mémoire associative

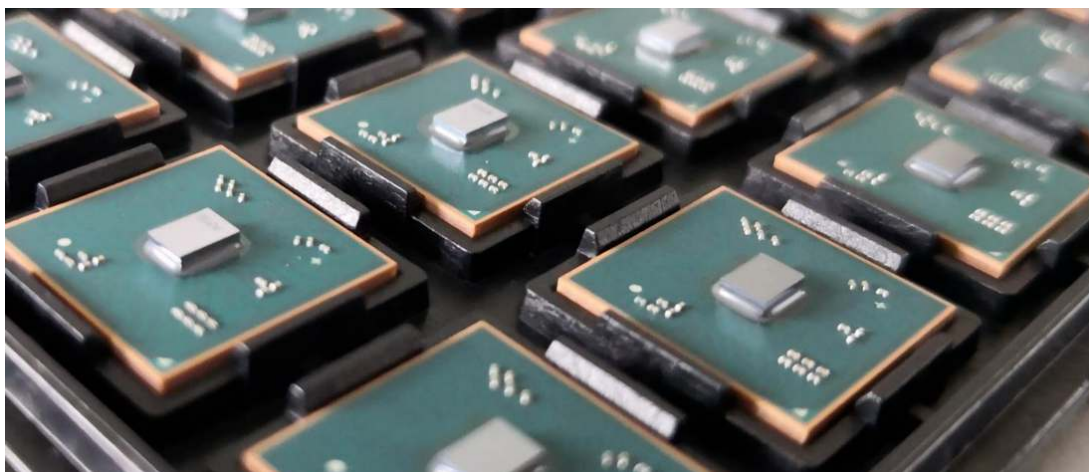
---

The AM08 Associative Memory ASIC Design, Architecture and Evaluation methodology, A. Annovi et al., 2022 11th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Bremen, Germany, 2022, pp. 1-5

doi : 10.1109/MOCASST54814.2022.9837600

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9837600>

<http://cds.cern.ch/record/2839917>



*Puces AM08 (16 bits \* 8 mots \* 12000 patterns, 28 nm) dans boîtier FCBGA 15x15". Crédit Sebastian Dittmeier (Heidelberg U).*

La contribution « mémoire associative » est significative des compétences en microélectronique numérique au LPNHE et notamment le savoir-faire en intégration et simulation globale des circuits. La proposition d'architecture de mémoire associative émise antérieurement à 2017 répond au besoin de résoudre des coïncidences d'alignement d'impacts au sein des dispositifs de reconstruction de traces en un temps très réduit. Dans ce cas, la technique de reconnaissance de motifs est adaptée et peut s'implémenter, dans le cas du détecteur concerné, avec une mémoire associative. Le principe est de présenter le motif à la mémoire en place et lieu de l'adresse ; les données correspondantes étant le résultat de l'algorithme de reconnaissance. Pour cette contribution, une implémentation de mémoire associative a été proposée et mise au point pour le circuit dédié « AMchip » dont nous avons aussi la responsabilité de l'intégration système. Le circuit est capable de traiter environ 19 Gbit/s et reconstruire environ 100 millions de trajectoires par seconde. Il est associé à un système complexe d'analyse numérique basé sur composant programmable ou processeurs graphiques auquel les équipes du LPNHE ont fortement contribué avec la mise au point du banc de caractérisation.

---

## Système de synchronisation du temps pour l'expérience Hyper-Kamiokande

---

<https://indico.in2p3.fr/event/28109/>

<https://indico.in2p3.fr/event/29205/>



*Les différents instruments pour la génération d'horloge qui font partie du « timing lab » du LPNHE.  
Crédit Vincent Voisin.*

Le détecteur Hyper-Kamiokande (HK) en cours de construction au Japon (voir première référence) sera le plus grand détecteur Cherenkov à eau souterrain, avec un réservoir cylindrique de 68 m de diamètre et 72 m de hauteur. Il sera équipé d'au moins 20 000 photo-détecteurs (PMT). Ce projet vise à développer et à produire le système de synchronisation des PMT. La synchronisation de chaque signal est cruciale pour une reconstruction précise des trajectoires des particules. Dans l'expérience HK, la résolution temporelle des PMT devrait être inférieure à la nanoseconde et la gigue inférieure à 100 ps RMS. L'association entre la base de temps locale et le temps universel coordonné (UTC) est également cruciale pour synchroniser l'acquisition des données avec le faisceau de neutrinos produit par le complexe d'accélérateur J-PARC et pour corréler les événements astrophysiques détectés avec d'autres détecteurs à travers le monde.

Le groupe LPNHE a mis en place un programme de R&D intensif afin d'établir les meilleures technologies à utiliser pour définir une base de temps très précise et fiable et la transporter vers tous les fronts du détecteur avec des distorsions minimales bien inférieures aux exigences de l'expérience (voir seconde référence). Ce programme a également permis de mettre en place une infrastructure et d'acquérir un savoir-faire en matière de génération et de distribution d'horloge dans le laboratoire, qui seront exportables dans d'autres expériences. Cela a été rendu possible grâce à une excellente collaboration avec le laboratoire du SYRTE (Observatoire de Paris). Grâce à ce programme de R&D, le LPNHE est maintenant équipé avec les instruments à l'état de l'art utilisés pour l'instrumentation métrologique du temps : récepteurs GNSS avec antennes, deux horloges atomiques au rubidium, une horloge atomique maser passive à hydrogène et deux fréquencemètres.



---

## Fête de la science

---

Voir par exemple : <https://lpnhe.in2p3.fr/spip.php?article1646>



*Fête de la science 2021 dans les locaux du laboratoire. Crédit LPNHE.*

Le pôle communication du service administratif, investi au niveau local et régional, organise, en relation avec les responsables scientifiques désignés par l'unité ou les expériences, les manifestations scientifiques propres de l'unité (biennale du laboratoire, séminaires), ou spécifiques aux projets scientifiques (colloques, cycle de conférences, réunion de collaboration).

Devant le constat de la désaffection des jeunes pour les études scientifiques, il met en œuvre des initiatives de communication avec le souci de sensibiliser les jeunes, ce qui se retrouve tant au niveau d'actions nationales que dans les relations avec l'enseignement supérieur. Pour toucher le grand public, dans le cadre de l'action nationale « Fête de la Science », le pôle a eu l'idée originale d'organiser le 1<sup>er</sup> Village des sciences du Campus Jussieu. Ces portes ouvertes du LPNHE accueillent, chaque année vers la mi-octobre, sur 3 jours, environ 1000 personnes dont des groupes scolaires, en mobilisant plus de 30 personnes (physicien.nes et ITA) pour ce temps fort. Une attention particulière a été portée vers le tissu éducatif puisque le laboratoire consacre deux jours, sur les trois, pour accueillir les élèves du cycle secondaire. Des visites guidées, des conférences, des expositions et des présentations d'expériences sont proposées à un public non averti, pendant toute la durée de l'événement. Le pôle communication à travers la médiation scientifique a pour objectif la diffusion des connaissances et cherche aussi à faire connaître le monde de la recherche afin d'attirer les jeunes vers nos métiers.









Directeur de la publication : Marco ZITO

Date de publication : mai 2023

*Illustrations générales :*

fête des 50ans du LPNHE, crédit LPNHE

LSST, crédit Vera C. Rubin Observatory

HESS, crédit Bastien Foucher et Sabine Gloaguen

LHCb SciFi, crédit CERN

LHC, crédit CERN

Machine à bonder, crédit LPNHE

biennale 2022, Saint-Brévin-les-Pins, crédit LPNHE

