

Sommaire

| | | | |
|---|---|-----|--|
|  | 1 LE LABORATOIRE LEPRINCE-RINGUET | 7 | |
| | 1.1 Histoire | 8 | |
| | 1.2 Organisation et projets | 10 | |
|  | 2 FAITS MARQUANTS 2019 – 2024 | 17 | |
|  | 3 LA RECHERCHE | 21 | |
| | 3.1 Physique des hautes énergies | 22 | |
| | 3.1.1 Contexte et objectifs | 22 | |
| | 3.1.2 La physique des particules avec l'expérience CMS | 23 | |
| | 3.1.3 Caractérisation du boson de Higgs par le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$ leptons | 30 | |
| | 3.1.4 Un calorimètre haute granularité pour CMS | 33 | |
| | 3.1.5 Prospective pour un futur collisionneur de haute intensité et haute énergie | 52 | |
| | 3.1.6 Calorimètre imageur ultra-granulaire pour un nouveau collisionneur e^+e^- | 54 | |
| | 3.1.7 La physique des saveurs dans l'expérience BaBar | 56 | |
| | 3.2 Physique des ions lourds | 58 | |
| | 3.2.1 Contexte et objectifs | 58 | |
| | 3.2.2 Physique des ions lourds dans l'expérience LHCb | 58 | |
| | 3.2.3 Physique des ions lourds dans l'expérience CMS | 62 | |
| | 3.2.4 Physique hadronique en collisions électron-ion | 65 | |
| | 3.3 Physique des neutrinos | 69 | |
| | 3.3.1 Contexte et objectifs | 69 | |
| | 3.3.2 Physique des neutrinos dans l'expérience T2K | 70 | |
| | 3.3.3 Le détecteur Super-FGD de T2K et son électronique de lecture | 72 | |
| | 3.3.4 Fond diffus de neutrinos de supernovæ dans SK | 75 | |
| | 3.3.5 Perspectives pour les neutrinos dans HK | 82 | |
| | 3.3.6 Le numériseur d'onde HKROC | 83 | |
| | 3.4 Astroparticules | 95 | |
| | 3.4.1 Contexte et objectifs | 95 | |
| | 3.4.2 Astronomie γ avec le satellite FERMI | 96 | |
| | 3.4.3 Astronomie γ avec l'expérience H.E.S.S. | 103 | |
| | 3.4.4 Multi-longueurs d'onde et multi-messagers avec Fermi et H.E.S.S. | 108 | |
| | 3.4.5 Méthodes innovantes de polarimétrie des rayons γ par conversion e^+e^- | 112 | |
| | 3.4.6 Astronomie- γ avec l'expérience CTA | 113 | |
| | 3.4.7 Conception des caméras NectarCAM pour CTA | 118 | |
| | 3.4.8 TeVCats un catalogue de sources γ au TeV | 120 | |
| | 3.5 Activités multidisciplinaires | 122 | |
| | 3.5.1 Contexte et objectifs | 122 | |
| | 3.5.2 Instrumentation dans le biomédical : PEPITES | 123 | |
| | 3.5.3 Accélération laser-plasma : GALOP | 128 | |
| | 3.5.4 Science & Jeu vidéo | 132 | |
| | 3.5.5 La simulation dans un monde ouvert : GEANT4 et SMILEI | 133 | |
| | 3.5.6 Méthodes d'apprentissage automatique | 137 | |
| | 3.6 Support à la recherche | 141 | |
| | 3.6.1 Contexte et objectifs | 141 | |
| | 3.6.2 Mécanique, électronique & instrumentation, informatique | 141 | |
| | 3.6.3 Contributions techniques marquantes | 149 | |
|  | 4 MÉDIATION SCIENTIFIQUE | 153 | |
|  | 5 ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET FORMATION | 157 | |
| | 5.1 Le LLR et l'enseignement supérieur | 158 | |
| | 5.2 Le Master de Physique des Hautes Énergies | 159 | |
| | 5.3 PhD, post-docs et HDR au LLR | 159 | |
| | 5.4 Stages et formation par la recherche | 159 | |
| | 5.5 La formation permanente | 160 | |
|  | 6 ORGANISATION ET RESSOURCES | 165 | |
| | 6.1 Caractéristiques du personnel au LLR | 166 | |
| | 6.2 Participation aux appels à projets | 167 | |
| | 6.3 Le service administratif | 168 | |
|  | 7 PRODUCTION SCIENTIFIQUE ET RAYONNEMENT | 179 | |
| | 7.1 Rayonnement du LLR | 180 | |
| | 7.2 Attractivité du LLR | 184 | |
| | 7.3 Prises de Responsabilités | 187 | |
| | 7.4 Contributions techniques du LLR | 189 | |
| | 7.5 Contributions à la physique | 190 | |
| | 7.7 Impact académique | 198 | |
| | 7.8 Médiation scientifique | 198 | |
| | Glossaire des acronymes | 200 | |

Prologue

Le laboratoire Leprince-Ringuet (LLR) se consacre à la recherche en physique des particules et des interactions fondamentales. Les particules élémentaires y sont un objet d'étude, mais aussi un outil pour l'astronomie ou pour des applications d'intérêt sociétal. En s'intéressant à l'origine et à la nature de la matière et des interactions dans l'Univers, le LLR explore, à travers les champs quantiques, la connexion existentielle entre la physique atomique et le cosmos : la physique des deux infinis. Pour défricher de nouveaux territoires, au-delà des frontières de la connaissance, il doit sans cesse contribuer à repousser les limites technologiques pour la détection des particules. Ainsi, le LLR a une implication forte et des engagements internationaux structurés autour de très grands instruments scientifiques, avec des contributions allant de la construction des détecteurs jusqu'à l'analyse et l'interprétation de grands ensembles de données.

Ce rapport décrit l'ensemble des activités de développement technique et de recherche au LLR pour la période 2019 – 2024 avec des équipes qui s'organisent aujourd'hui autour de cinq thématiques principales :

- **la physique des hautes énergies** auprès de grands collisionneurs avec, entre autres, le boson de Higgs et la brisure de symétrie électrofaible ;
- **la physique hadronique** avec l'interaction nucléaire forte à haute densité et haute température (plasma de quarks gluons) dans des collisions d'ions lourds ;
- **la physique des neutrinos** avec la recherche d'une contribution à l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers et les explosions d'étoiles ;
- **l'astronomie gamma (γ)** avec l'étude de nouvelles sources transitoires de rayons cosmiques de très hautes énergies ;
- **la recherche multidisciplinaire** à vocation applicative avec la valorisation sociétale des techniques mises en œuvre dans nos domaines de recherche.

Les thématiques de physique du LLR se situent dans le cœur de métier de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) au CNRS et bénéficient d'un **support technique important en mécanique, en électronique & instrumentation ainsi qu'en informatique**. La recherche multidisciplinaire apporte un complément essentiel qui renforce l'implantation du LLR au sein du département de physique de l'École polytechnique et les relations avec les autres laboratoires sur le campus de l'Institut Polytechnique de Paris. La période décrite dans ce rapport a été particulièrement intense avec des résultats et des réalisations majeures dans chacun de nos domaines de recherche.

Yves Sirois

Directeur du Laboratoire Leprince-Ringuet
CNRS/IN2P3 École polytechnique
Institut Polytechnique de Paris

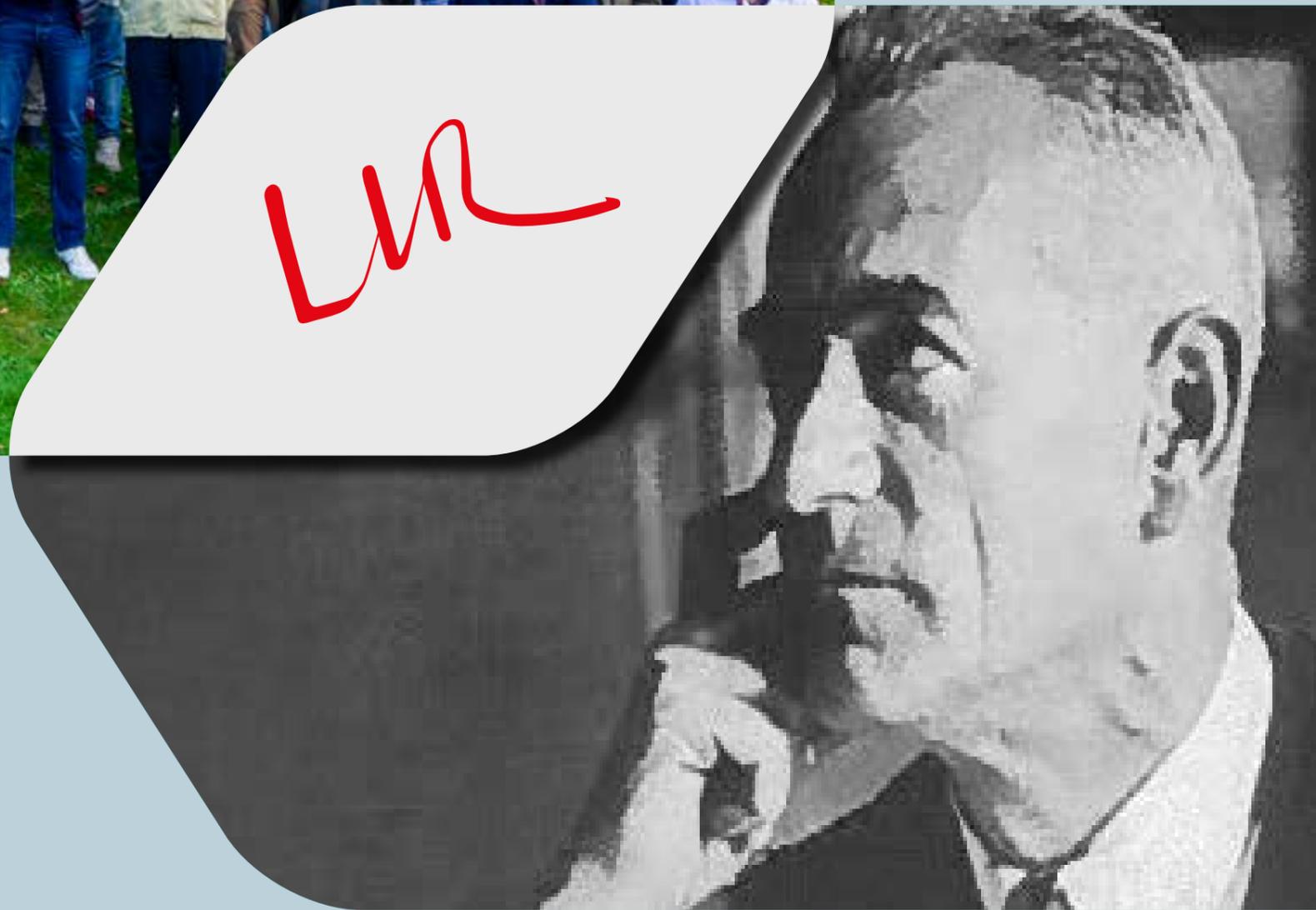


16 juin 2024

1 LE LABORATOIRE LEPRINCE-RINGUET



LMR



1.1 Histoire

Depuis sa création en 1936 à l'École polytechnique, le Laboratoire Leprince-Ringuet (anciennement LPNHE) poursuit des recherches en physique des particules élémentaires. Il s'intéresse à l'origine et à la structure de la matière et des interactions fondamentales dans l'Univers ainsi qu'aux rayons cosmiques de hautes énergies. Jusqu'aux années 1950, il a été pionnier en physique des rayons cosmiques et a contribué à la découverte des premiers mésons et baryons lourds comprenant un quark étrange, le kaon et l'hypéron. Il a ensuite amorcé dans les années 1960 une série d'expériences auprès des accélérateurs et collisionneurs du CERN et lancé un programme de développement de chambres à bulles menant à la découverte des courants neutres dans l'expérience Gargamelle en 1973. D'abord installé sur le site originel de l'École polytechnique sur la montagne Sainte-

Geneviève à Paris, le LLR déménage en 1974 pour s'installer sur le plateau de Saclay dans les nouveaux bâtiments de l'École à Palaiseau. Attaché à l'IN2P3, c'est aujourd'hui un laboratoire mixte du CNRS et de l'École polytechnique à Palaiseau. Précédemment liée à l'Université Paris-Saclay, l'École polytechnique est désormais associée avec plusieurs autres grandes écoles de sciences et technologie à de l'Institut Polytechnique de Paris (IPP).

Le LLR s'appuie sur l'expertise variée des groupes techniques et des physiciens et physiciennes pour participer à toutes les étapes de grands projets expérimentaux répartis autour de la planète, depuis la construction des détecteurs, l'acquisition et le traitement des données, jusqu'à l'analyse et l'interprétation des résultats. Dans les années 1980-1990, il a été impliqué dans les expériences UA4 pour l'interaction nucléaire forte auprès du collisionneur proton-antiproton du CERN (Sp \bar{p} S), l'expérience ALEPH pour

l'interaction électrofaible auprès du collisionneur e⁺e⁻ du LEP au CERN, ou dans l'expérience H1 pour la structure du nucléon auprès du collisionneur ep HERA à DESY. Il a par ailleurs lancé un programme pionnier d'astroparticules à l'IN2P3, ouvrant une nouvelle fenêtre pour comprendre l'origine des rayons cosmiques de hautes énergies, avec les expériences CAT et CELESTE installés sur le site d'une ancienne centrale solaire à Thémis dans les Pyrénées. Avec les expériences NA38 et NA50 et les collisions d'ions lourds ultra-relativistes, le LLR a été protagoniste de la découverte de la suppression d'états liés du J/ ψ mettant ainsi en évidence la production d'un plasma de quarks et de gluons (QGP), un nouvel état déconfiné de la matière nucléaire à haute densité et haute température. La physique des ions lourds s'est poursuivie dans les années 2000 avec l'expérience PHENIX auprès du collisionneur RHIC à Brookhaven qui a contribué à la mise en évidence d'un comportement de liquide parfait du QGP. Enfin, le LLR a participé à la construction et à l'analyse des données de l'expérience

BaBar, dédiée à la physique des saveurs et la violation CP dans le secteur des quarks, qui demeurera à la pointe du domaine pendant plus d'une décennie.

Dans les années 2010, le LLR a été protagoniste de la découverte du boson de Higgs au sein de l'expérience CMS auprès du collisionneur LHC. Il a contribué à sa caractérisation avec, entre autres, la découverte du couplage de Yukawa des fermions au champ de Higgs. Il a participé à l'observation de l'oscillation $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ dans l'expérience T2K au Japon qui s'appuie sur une combinaison de détecteurs proches et du détecteur lointain SK. Il a contribué à ouvrir une nouvelle fenêtre sur les événements transitoires violents dans l'Univers en astronomie γ avec les expériences Fermi-LAT sur satellite et le télescope au sol H.E.S.S. pour la détection de lumière Čerenkov atmosphérique.

Le LLR poursuit aujourd'hui des recherches dans l'expérience CMS au CERN en physique des particules et des ions lourds. Il est impliqué dans le développement d'une calorimétrie haute granularité adaptée au programme de

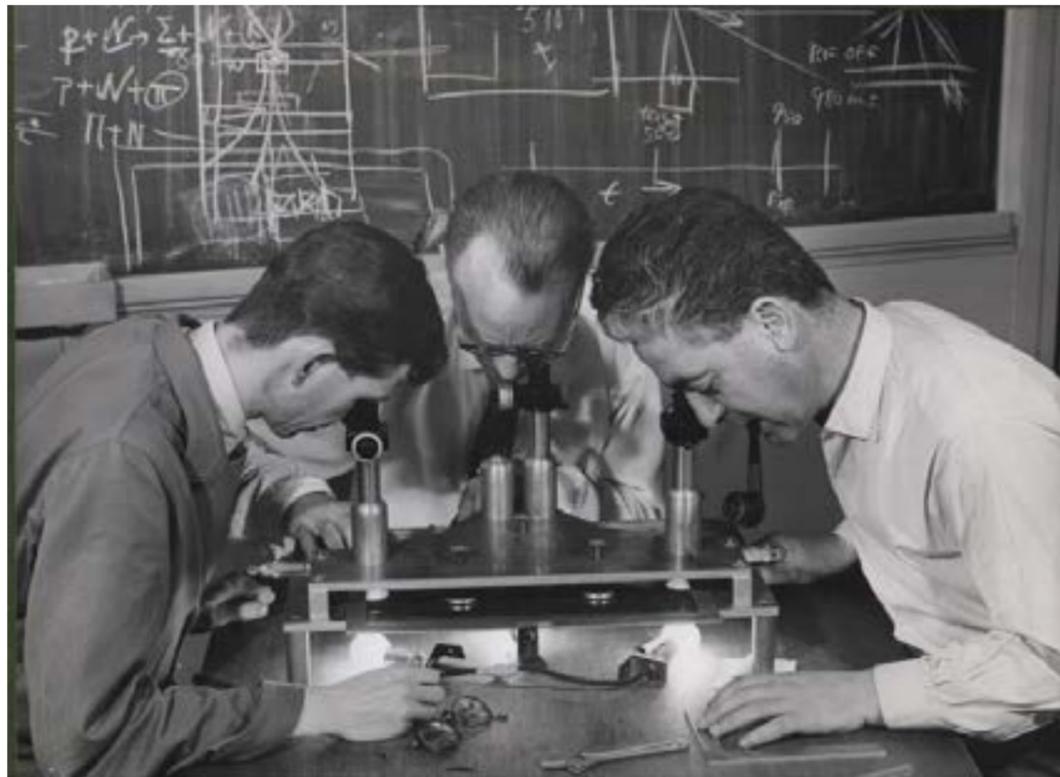


Photo de notre laboratoire dans les années 50 : Examen d'émulsion au microscope.



Photo : Début de l'astronomie gamma : Laboratoire de l'Aiguille du midi dans les années 40.

très haute luminosité du collisionneur LHC (HL-LHC) ou en vue d'un futur collisionneur $e^+ e^-$. Il a rejoint en 2020 l'expérience LHCb au CERN pour l'exploitation des données de physique des ions lourds en cible fixe, et s'intéresse à la physique hadronique et à la structure du noyau atomique avec l'expérience ePIC auprès du collisionneur EIC à Brookhaven, USA. Il participe au Japon à la jeunesse des détecteurs proches de T2K, exploite les données de T2K et SK, et contribue depuis 2020 au développement de la future expérience HK. Il exploite les nouvelles données de Fermi-LAT et H.E.S.S. et prépare la mise en route de la grande expérience de télescope à imagerie Čerenkov CTA. Le LLR soutient des applications transverses avec les techniques et algorithmes d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle pour les expériences. Il soutient en parallèle des activités de physique appliquée avec les profilers de faisceaux pour la médecine, les techniques d'accélération laser-plasma et la médiation scientifique par le jeu vidéo. Il est impliqué dans le développement des grands logiciels de simulation avec GEANT4 pour les interactions particules-matière et SMILEI pour les interactions laser-plasma.

1.2 Organisation et projets

Le LLR s'organise autour de quatre thématiques scientifiques de recherche en physique des particules au sens large (physique des hautes énergies, physique hadronique et des ions lourds, physique des neutrinos et astroparticules), auxquelles sont attachés les groupes de physique (ou équipes de physique) généralement associés à des projets internationaux reconnus par l'IN2P3, ainsi que d'une thématique de diversification multidisciplinaire à vocation applicative. Ces thématiques fixent, avec les réalisations des groupes de support à la recherche, les principaux chapitres de ce rapport d'activité. Un organigramme structurel illustrant l'organisation du LLR

avec la liste des personnes actuellement¹ responsables de chaque thème est montré à la **Figure 1**.

Le programme de recherche couvre l'interaction électrofaible des hautes énergies auprès de grands collisionneurs, l'interaction nucléaire forte à haute densité et haute température dans des collisions impliquant des ions lourds, la recherche de la violation CP dans le secteur des neutrinos et les événements cosmiques transitoires avec l'astronomie gamma (γ). Les détecteurs innovants et les technologies en mécanique, électronique et informatique conçus pour ces recherches trouvent des applications développées au LLR avec le profilage de hadrons en thérapie du cancer, l'accélération de particules par interaction laser-plasma, la médiation scientifique à travers les jeux vidéo ou l'application de techniques novatrices d'apprentissage automatique à la physique des particules.

Le laboratoire s'appuie sur un effectif moyen d'un peu plus de 100 personnes auxquelles se greffe chaque année pour quelques semaines ou plusieurs mois une trentaine de stagiaires de niveau lycée, licence ou master (M1 ou M2). Environ un tiers des effectifs est constitué d'ingénieurs, de techniciens ou de personnels administratifs (ITA), un tiers de physiciens, et un tiers des doctorants ou post-doctorants en contrat à durée déterminée (CDD).

Dans le détail, on compte actuellement au LLR :

- 30 physicien(e)s permanents ;
- 29 ingénieur(e)s ou technicien(e)s (IT) permanents ;
- 15 post-doctorant(e)s et 1 IT en contrats à durée déterminée ;
- 22 doctorant(e)s ;
- 5 personnels administratifs (A) ;
- 2 stagiaires IT en apprentissage ;
- 2 chercheurs émérites.

L'effectif permanent pour les chercheurs

¹ Les effectifs et listes de noms de personnes dans ce rapport correspondent, sauf indication contraire, à une photographie prise au 31 décembre 2023.

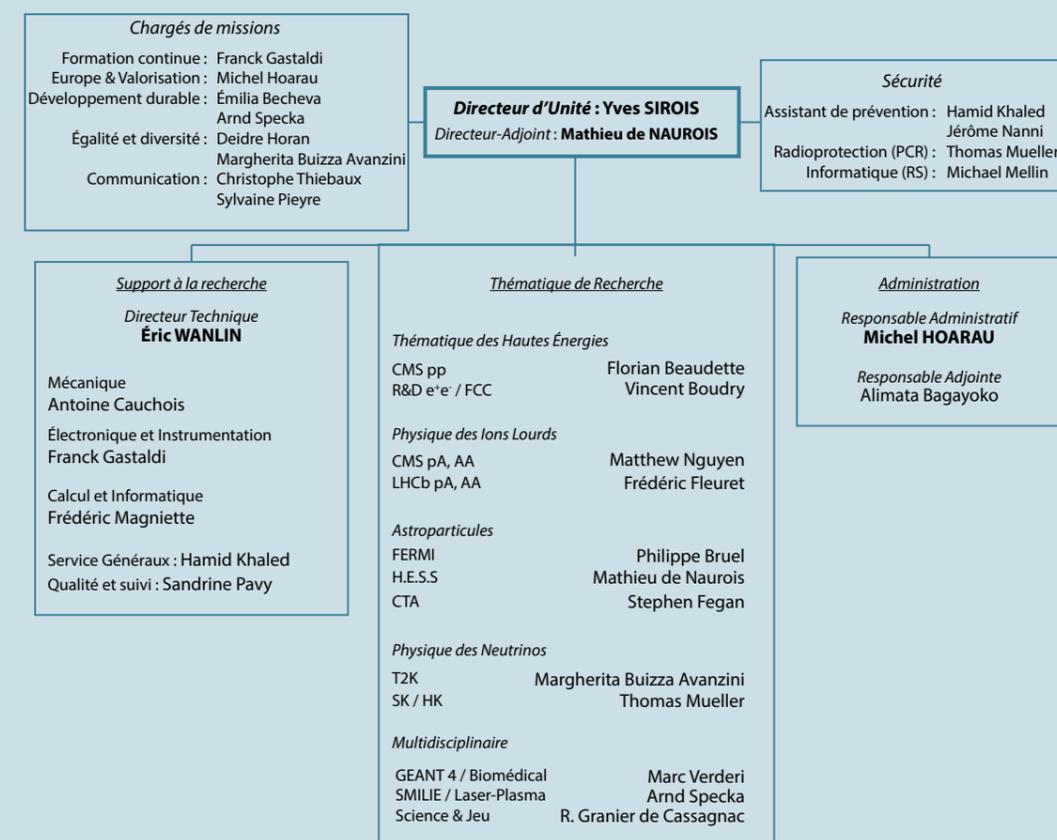


Figure 1 : Organigramme structurel du LLR montrant la répartition des groupes au sein des thématiques et avec la liste des personnes responsables de groupes, de services ou porteurs de missions spécifiques au 31 décembre 2023.

est quasi exclusivement constitué de personnel CNRS, à l'exception d'une professeure plein temps de l'École polytechnique (l'X). Environ un quart des effectifs ITA (9/35^{ème}) est constitué de personnels de l'X. Par ailleurs, l'enseignement à l'X et à l'Institut Polytechnique de Paris (IPP) est largement fourni par des professeurs chargés de cours. Environ un tiers des physiciens et physiciennes CNRS du laboratoire ont été directement impliqués dans la vie académique de l'X ou de l'IPP, pour des cours à temps partiel (Bachelor de l'IPP ou cycle ingénieur de l'X), l'organisation travaux pratiques en laboratoires pour les élèves, l'organisation du concours d'entrée de l'X, ou encore la codirection du Master de Physique des Hautes Énergies (*Master HEP*) commun entre l'X et ETH Zurich.

Les projets de physique en cours au LLR s'inscrivent au niveau de l'IN2P3 dans une classification en termes de *Master Projets*. Chacun des principaux thèmes scientifiques du LLR comprend une implication forte dans des Master Projets présentant des enjeux majeurs pour l'institut, avec des engagements techniques au niveau international et des implications en termes de ressources humaines plus ou moins importantes. Pour l'électronique frontale d'acquisition dans de nombreux projets, le laboratoire s'appuie fortement sur la plateforme nationale OMEGA (*Organisation de micro-électronique générale avancée*) installée à proximité à l'École polytechnique.

En physique des hautes énergies, le projet CMS auprès du collisionneur LHC du CERN est un projet majeur de l'institut avec un engagement technique fort du

LLR pour la construction d'un nouveau calorimètre haute granularité (HGAL). Les développements pour les détecteurs auprès d'un futur collisionneur e^+e^- , comme par exemple le nouveau projet de grand collisionneur circulaire (FCC) du CERN, sont aussi un enjeu important de l'institut avec toutefois un engagement limité pour l'instant au LLR et centré sur la calorimétrie ultra-granulaire.

La physique des ions lourds est étudiée au sein de l'expérience CMS, en mode collisionneur. Elle concerne aussi l'expérience LHCb au CERN principalement sur cible fixe SMOG. Le LLR y est à l'origine depuis 2015 d'un programme de physique porté conjointement avec des collègues du laboratoire IJClab à l'Université Paris-Saclay. Le groupe LHCb du LLR a rejoint officiellement la collaboration LHCb au début de l'automne 2020. L'expérience LHCb est par ailleurs un projet majeur de l'institut pour la physique des saveurs de quarks lourds, un domaine dans lequel le LLR a été fortement impliqué dans une génération précédente d'expériences avec BaBar auprès du SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*) en Californie. Un physicien des ions lourds de CMS (Matthew Nguyen) a officiellement rejoint en mai 2024 le projet d'expérience ePIC auprès du futur collisionneur EIC (Electron-Ion Collider) au laboratoire national de Brookhaven, USA. Le LLR explore actuellement les opportunités de contributions techniques pour ce projet.

La physique des neutrinos au LLR concerne le projet T2K, qui exploite les faisceaux de l'accélérateur J-PARC à Tokai au Japon, ainsi que les données du détecteur Super-Kamiokande (SK). L'équipe *neutrinos* du LLR s'est par ailleurs fortement impliquée dans la R&D pour le projet d'expérience Hyper-Kamiokande (HK) depuis l'été 2020, grâce, entre autres, à un premier support financier important de l'École polytechnique. Un MoU a été signé à l'automne 2024 entre l'IN2P3 et HK pour spécifier les engagements financiers et les engagements techniques

des laboratoires de recherche impliqués, le LLR à l'École polytechnique et le LPNHE de Sorbonne Université et Université Paris Cité. Le LLR y est fortement associé au laboratoire international de recherche ILANCE basé à l'Université de Tokyo.

Le domaine des astroparticules au LLR comprend des projets à enjeux scientifiques majeurs pour l'IN2P3 tels l'expérience sur satellite de la collaboration Fermi-LAT (*Large Area Telescope*) ou le système de télescopes à imagerie Čerenkov H.E.S.S. (*High Energy Stereoscopic System*) en fonctionnement à Gamsberg en Namibie. Ces projets continuent à collecter et analyser des données avec désormais des engagements techniques limités. Le groupe d'astronomie γ du LLR est par ailleurs impliqué dans le projet CTA (*Čerenkov Telescope Array*) qui constitue la prochaine génération de réseaux de télescopes à effet Čerenkov atmosphérique. Le LLR a assuré la conception et le suivi de production de la mécanique des caméras NectarCAM pour les MSTs (*Medium-Size Telescopes*) qui joueront un rôle central pour le site Nord de l'expérience à La Palma dans les îles Canaries.

Le LLR est par ailleurs engagé dans des projets de recherche et développement prometteurs pour les applications dans le domaine du biomédical avec le projet PEPITES ou les techniques d'accélération de particules par interaction laser-plasma avec le projet GALOP. Il a aussi accueilli pendant cinq ans une chaire *Science & Jeu vidéo* dirigée par un physicien du LLR et qui a rayonné fortement sur le campus de l'IPP.

La répartition des principaux projets internationaux du LLR sur et autour du globe est illustrée à la **Figure 2**.

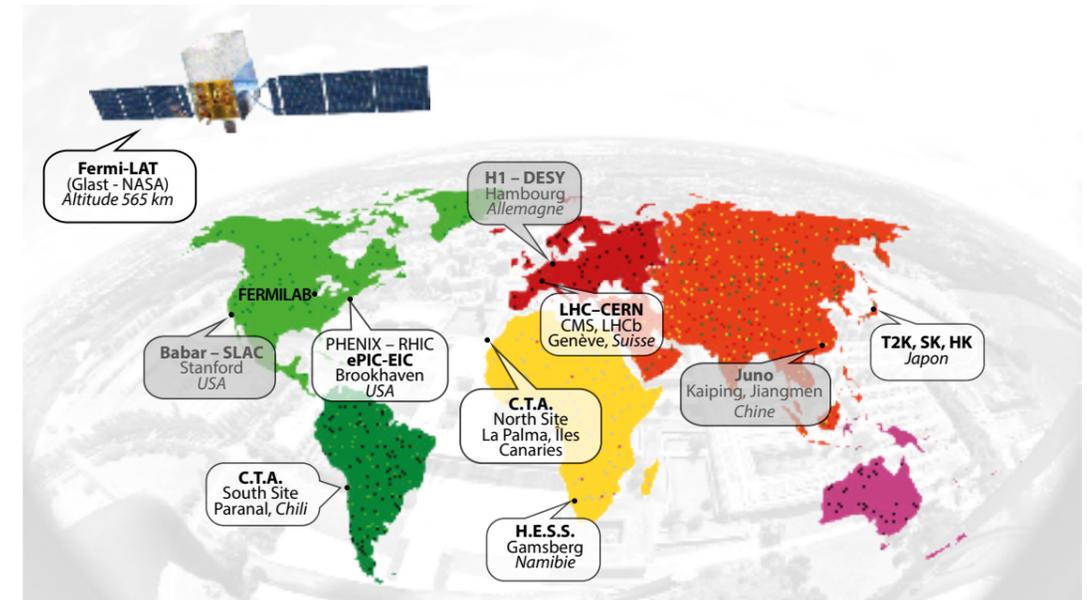
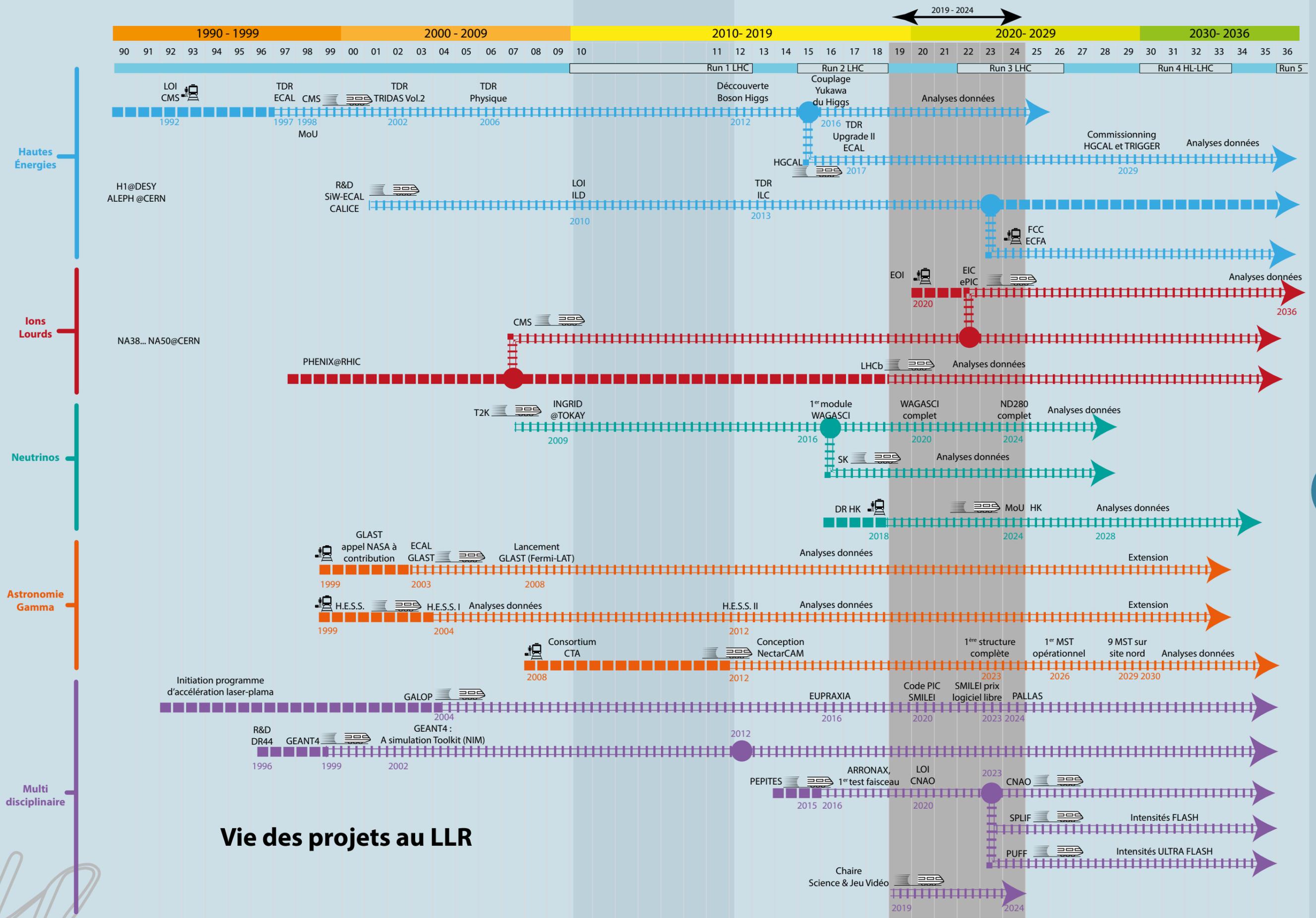
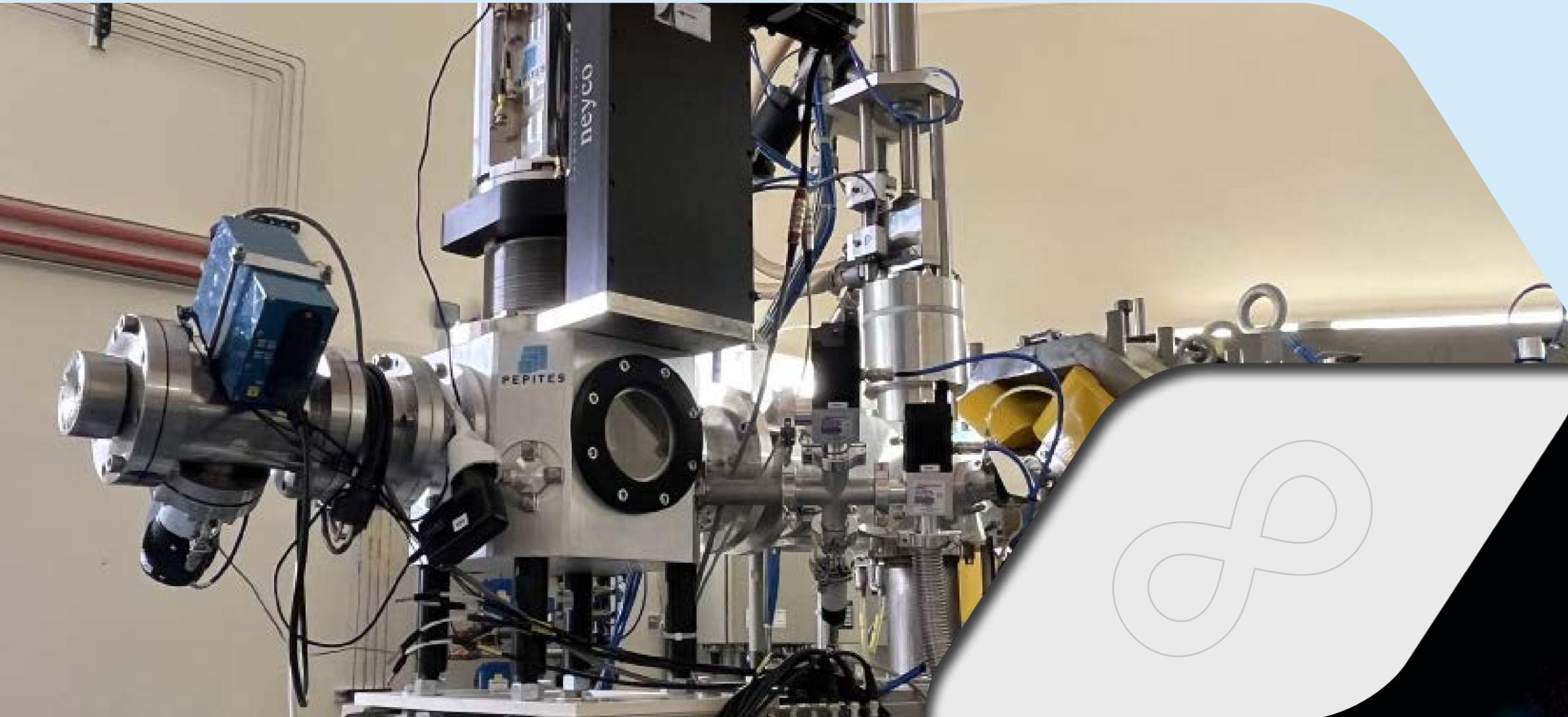


Figure 2 : Répartition des principaux projets internationaux impliquant le LLR à l'échelle de la planète.



Vie des projets au LLR

2 FAITS MARQUANTS 2019 – 2024



3 LA RECHERCHE



3.1 Physique des hautes énergies

3.1.1 Contexte et objectifs

La physique des particules des hautes énergies est au cœur des activités scientifiques du LLR avec un personnel en physiciens permanents de 12 personnes et une quinzaine de post-doctorants et doctorants. La thématique concerne l'expérience CMS auprès du collisionneur LHC au CERN, avec des responsabilités liées aux réalisations techniques du LLR ainsi que pour l'analyse de physique des données en collisions proton-proton, la construction d'un nouveau calorimètre pour les futures prises de données à très haute luminosité au LHC (HL-LHC), la recherche et développement pour un calorimètre-imageur pour une future expérience e^+e^- , et la prospective de physique auprès d'une future "usine à Higgs", un collisionneur de type ILC (*International Linear Collider*) ou FCC (*Futur Circular Collider*).

Au moment où débute la période de référence pertinente ici, l'expérience CMS termine la quatrième et dernière année de collecte de données de Run 2 (2015 – 2018) auprès du collisionneur proton-proton LHC, à une énergie dans le centre de masse (\sqrt{s}) record de 13 TeV. Auparavant, le groupe CMS du LLR avait été protagoniste de la découverte du boson de Higgs (H) au LHC avec les données du Run 1 (2010 – 2012). Il avait assumé la responsabilité de l'analyse et des publications de CMS dans l'un des deux principaux canaux d'observation, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$ leptons, avec la mesure de masse et la détermination des nombres quantiques de spin et de parité du boson. Il a par la suite obtenu la première contrainte significative sur la largeur intrinsèque de la résonance. En parallèle, il a contribué à la première mise en évidence de l'existence directe d'un couplage de Yukawa des fermions au champ de Higgs avec le canal $H \rightarrow \tau\tau$. Il a ainsi été établi, d'une part, que la

nouvelle particule est associée à un champ scalaire présumé responsable d'un mécanisme de brisure spontanée de la symétrie électrofaible, à l'origine de la masse des bosons vecteurs (spin 1) de l'interaction faible, et que d'autre part, au moins pour les quarks et leptons les plus lourds, les fermions (spin $\frac{1}{2}$) acquièrent une masse via les couplages de Yukawa en se propageant dans le vide quantique modifié par la présence du champ de Higgs. Le groupe CMS avait de surcroît été leader pour la recherche de l'auto-couplage du boson H via le canal de production de paires HH dans la voie $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$. Au total, le Run 2 aura fourni une luminosité intégrée de plus de 140 fb^{-1} à $\sqrt{s_{pp}} = 13 \text{ TeV}$, à comparer aux $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$ à $\sqrt{s_{pp}} = 7 \text{ TeV}$ de 2011 et $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$ à $\sqrt{s_{pp}} = 8 \text{ TeV}$ de 2012. C'est donc une amélioration considérable de la statistique de production pour le boson H dont bénéficient les nouvelles analyses avec l'ouverture de nouveaux canaux d'observation.

En parallèle avec ses activités d'analyse, et profitant d'un important support pour "projet emblématique" du LabEx P2IO de Paris-Saclay, le groupe avait entamé dès 2014 un programme de R&D en calorimétrie haute granularité en collaboration avec les groupes du CERN, de l'Université Santa Barbara, de Imperial College London et de l'Université du Minnesota. Ce programme a débouché sur une proposition, acceptée en mai 2015 par la Collaboration CMS, pour un nouveau calorimètre "HGICAL" équipé de puces électroniques "HGCROC" conçues par le centre de micro-électronique OMEGA à l'École polytechnique. Le projet HGICAL regroupe aujourd'hui environ 45 laboratoires d'Amérique, d'Europe et d'Asie. Le LLR et le groupe CMS ont pris des responsabilités majeures en mécanique, en électronique et en informatique pour ce projet destiné à HL-LHC. Une part importante des ressources techniques du LLR est mobilisée sur le projet HGICAL au cours de la période de référence concernée par ce rapport.

Les effectifs

Le **groupe CMS pour la physique des hautes énergies** dirigé par Florian Beaudette assisté par Roberto Salerno comprend 11 permanents et 13 doctorants ou post-doctorants au 31 décembre 2023 :

- **Permanents** : Florian **Beaudette**, Philippe **Busson**⁽¹⁾, Claude **Charlot**, Olivier **Davignon**, Adinda **de Wit**, Andrew **Gilbert**, Christophe **Ochando**, Roberto **Salerno**, Jean-Baptiste **Sauvan**, Yves **Sirois**, Alexandre **Zabi** et Amina **Zghiche**.

⁽¹⁾<05/2021

- **Post-doctorants** : Alessandra Cappati et Shamik Ghosh.

- **Doctorants** : Bruno Alves, Marco Chiusi, Théo Cuisset, Trisha Debnath, Isaac Ehle, Geliang Liu, Martina Manoni, Andro Petkovic, Ana Sculac et Elena Vernazza.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Sudha Ahuja⁽²⁾, Chiara Amandola⁽¹⁾, Matteo Bonanomi⁽¹⁾, Axel Buchot Parraguin⁽¹⁾, Sébastien Extier⁽¹⁾, Duje Giljanovic⁽¹⁾, Shamik Ghosh⁽²⁾, Alexandre Hakimi⁽¹⁾, Artur Lobanov⁽²⁾, Cristina Martin-Perez⁽¹⁾, Jona Motta⁽¹⁾, Louis Portales⁽²⁾, Marina Prvan⁽¹⁾, Jonas Rembser⁽¹⁾, Alessandro Tarabini⁽¹⁾, Uttiya Sarkar⁽²⁾ et Toni Sculac⁽¹⁾.

⁽¹⁾Ph.D. ⁽²⁾post-doc

Au cours de cette même période, le LLR a poursuivi par ailleurs ses activités de R&D pour un nouveau calorimètre électromagnétique ultra-granulaire, ou calorimètre-imageur, en silicium-tungstène (SiW-ECAL), optimisé pour la reconstruction de flux de particule (*Particle Flow*). Le détecteur innovant avait été initialement développé au sein de la collaboration CALICE à partir des années 2000 pour la physique auprès d'un collisionneur ILC et inspiré le projet HGICAL de CMS avec son électronique frontale intégrée au cœur même de l'objet. Le projet a évolué pour s'intégrer dans le cadre de la nouvelle feuille de route européenne et s'adapter aux très hautes luminosités de collisions e^+e^- envisagées auprès d'un futur FCC au CERN.

3.1.2 La physique des particules avec l'expérience CMS

Le groupe CMS du LLR a vécu une période 2018 – 2023 particulièrement

féconde, avec la conclusion d'une grande campagne de prise de données du LHC permettant le développement de plusieurs analyses de tout premier plan, et, en parallèle, avec un investissement croissant dans plusieurs secteurs clefs du projet HGICAL, un des plus ambitieux pour la jouvence de l'expérience en vue de HL-LHC.

Les membres du groupe CMS du LLR partagent depuis longtemps la conviction que la qualité et la puissance d'une analyse reposent sur la maîtrise d'une chaîne complète, incluant la connaissance des détecteurs et des sélections du système de déclenchement pendant la prise de données, et passent par l'innovation et l'optimisation en matière de reconstruction et d'outils d'analyse. Cette expertise à de multiples niveaux se traduit aujourd'hui par une reconnaissance par la collaboration, notamment par des postes de responsabilité de niveau 1 avec siège au

comité de direction (R. Salerno : physics coordinator; A. Zabi: trigger project leader) mais également des postes de coordinateurs (conveners) de niveau 2 transverse à toute la collaboration, (O. Davignon: level 1 DPG; A. Lobanov: systèmes tests HGICAL; M. Nguyen: reconstruction; R. Salerno: Higgs PAG; A. Zghiche: ECAL DPG; A. Zabi: Trigger Phase 2); Ch. Ochando: HGICAL *mechanics*. Les arrivées en 2023 d'A. de Wit et d'A. Gilbert, coordinateurs des groupes Higgs PAG et SMP PAG viennent s'ajouter à cette liste. De plus, une dizaine de postes de responsabilités de sous-groupe de niveau 3 ont été occupés par des membres du groupe dans cette période, majoritairement par des post-doctorants.

Le groupe peut également s'enorgueillir d'avoir attiré des étudiants et des post-doctorants de grande qualité. En 5 années, 3 thèses du groupe ont été primées et 7 récompenses CMS ont été décernées à des membres du groupe. Il convient de noter enfin la synergie entre les activités pp et collisions d'ions lourds du groupe: les efforts sur la reconstruction sont communs entre les deux domaines, et d'ailleurs M. Nguyen, responsable de la reconstruction de CMS, est un expert des collisions d'ions lourds. De plus, la sophistication croissante des analyses pour les collisions d'ions lourds emprunte de plus en plus à celles du secteur pp, et la mise au point de critères de déclenchement qui sont progressivement injectés dans les prises de données d'ions lourds bénéficie de l'expertise du groupe. Enfin, l'implication dans le projet HGICAL est commune à l'ensemble des membres du groupe CMS quel que soit leur domaine de physique de prédilection.

L'année 2018 correspond à la fin de la prise de données du Run 2. La période qui a suivi a logiquement été fortement consacrée à l'analyse de ces données avec une focalisation sur l'étude du secteur scalaire qui constitue depuis plus

d'une décennie le cœur de l'expertise du groupe. Les données du Run 2 ont également été mises à profit comme banc de test pour la mise au point de techniques innovantes d'analyse, de reconstruction, et de critères de déclenchement déployés dans le Run 3 débuté en 2022 et qui sont aussi des sources d'inspiration pour la future phase de haute luminosité.

La période 2018–2023 a donc été particulièrement intense pour le groupe dans le domaine de l'analyse mais elle a conjointement marqué une montée en puissance spectaculaire pour son implication dans le projet HGICAL (High Granularity CALorimeter). Les actuels calorimètres bouchons qui ne pourront affronter les conditions de prise de données du HL-LHC seront remplacés par un calorimètre innovant, à échantillonnage, avec des absorbeurs en plomb (resp. acier) dans la partie électromagnétique (resp. hadronique) et utilisant une technologie silicium haute granularité dans la section électromagnétique et les parties les plus exposées de la section hadronique; des scintillateurs étant utilisés dans le reste. Le calorimètre comporte 6 millions de voies. La haute granularité est indispensable pour limiter l'effet des 200 collisions simultanées attendues au HL-LHC, d'autant que la résolution temporelle de l'ordre de 30 ps pour les gerbes permettra de rejeter les particules issues des événements empilés grâce à la différence de temps de vol.

Le laboratoire a été un acteur majeur du projet HGICAL dès l'origine du projet en 2014. Grâce au soutien important du LabEx P2IO sous la forme d'un *projet emblématique* bien doté, il a pu s'impliquer dans de nouveaux développements en calorimétrie haute granularité et renforcer sa collaboration avec OMEGA. Après l'acceptation conditionnelle du projet HGICAL par la collaboration en 2015, une phase de maturation a suivi jusqu'à la publication, à l'automne 2017, d'un *Technical*

Design Report [CMS-TDR-019, CERN-LHCC-2017-023, The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter]. Les projets dans lesquels le laboratoire s'est engagé ont été alors définis. Le LLR est co-responsable de la conception de la structure mécanique générale de HGICAL et il assume la responsabilité de la mécanique des cassettes contenant une double couche de lecture et les plaques de refroidissement associées. Il conçoit et réalise les plaques en cuivre qui permettront le refroidissement des cassettes par CO₂ diphasique, les pièces mécaniques pour l'assemblage des éléments actifs de la cassette, ainsi que les outils pour déplacer et assembler les cassettes. Cet effort est coordonné par Ch. Ochando. D'autre part, J.-B. Sauvan dirige les développements algorithmiques pour le système de déclenchement de niveau 1; ces recherches nécessitent à leur tour de créer des outils de simulation, d'analyse, de visualisation. Le système de déclenchement est par ailleurs un champ de R&D dans le domaine de l'intelligence artificielle afin que les réseaux de neurones profonds puissent être mis en œuvre sur des FPGA pour des sélections optimisées des objets, voire pour la reconstruction en ligne.

En fort lien avec nos collègues du laboratoire OMEGA qui est en charge des ASICs de lecture, HGCROC, O. Davignon coordonne la mise au point de la procédure automatisée de test, à l'aide de deux robots, des 120 000 ASICs qui seront validés au laboratoire avant d'être montés sur l'électronique du détecteur; une étape d'une importance cruciale pour le fonctionnement futur du détecteur. La mise en œuvre de ce projet a été l'occasion d'une forte synergie entre l'ensemble des groupes techniques du laboratoire et des physicien(ne)s.

Au sein du groupe, la certitude que la sensibilité d'une analyse est fortement corrélée à la qualité et à la bonne compréhension des objets reconstruits, est fortement ancrée. F. Beaudette coordonne les développements

algorithmiques avec, dans la période considérée, une priorité mise sur les objets électromagnétiques et en particulier les électrons. La reconstruction de ces derniers, utilisée dans le Technical Design Report publié en 2018, est l'œuvre du LLR. Le grand nombre de canaux et le défi de la gestion de l'empilement sont deux problématiques dans lesquelles les approches de Machine Learning apportent des gains significatifs, c'est donc naturellement que les physiciens impliqués dans la reconstruction et le système de déclenchement mettent leurs efforts en commun.

À ces trois grandes thématiques, il convient de rajouter une contribution technique récente d'O. le Dortz sur la conception de trois PCB de grandes dimensions appelés "wagons". Ce sont des wagons qui permettront la configuration des ASICs, la transmission des informations d'horloge et l'envoi des données diverses.

L'implication du groupe dans le projet HGICAL couvre également la participation aux faisceaux tests et à l'analyse de leurs données. Une campagne a été effectuée en 2018 avec une tranche réaliste des calorimètres électromagnétique et hadronique. Les membres du groupe ont joué un rôle primordial dans la caractérisation du détecteur avec des données réelles, en particulier sur les performances de la section électromagnétique en termes de résolutions en énergie et en temps. L'accord données-simulation s'est avéré d'une grande qualité. Plus récemment, ces données ont aussi servi de banc de tests aux tous derniers développements en matière de reconstruction algorithmique. D'autres campagnes de tests ont eu lieu et ont surtout permis de caractériser les performances de l'ASIC HGCROC. Le groupe s'est impliqué dans ces tests, de même que dans la mesure des performances avant et après irradiation. De multiples campagnes ont été menées, avec des rayons X, avec des ions lourds, permettant de tester

les parties analogiques et digitales de l'HGCROC.

L'activité d'analyse du groupe s'articule autour de deux pôles principaux : l'étude du secteur scalaire en continuité avec le rôle de premier plan joué par le groupe dans la découverte du boson de Higgs, et l'étude du plasma quark-gluon au sein des collisions d'ions lourds. Ce champ d'étude est l'objet de la section suivante.

Dans le secteur scalaire, l'accroissement

significatif de luminosité intégrée d'un facteur cinq ainsi que l'augmentation de section efficace de production ($\times 2.5$ pour la fusion de gluon) ont propulsé l'étude du boson de Higgs dans l'ère des mesures de précision et ont parallèlement permis d'étendre la gamme des couplages accessibles.

La statistique dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ (**Figure 3**) montre que, de la vingtaine d'événements observés dans ce canal

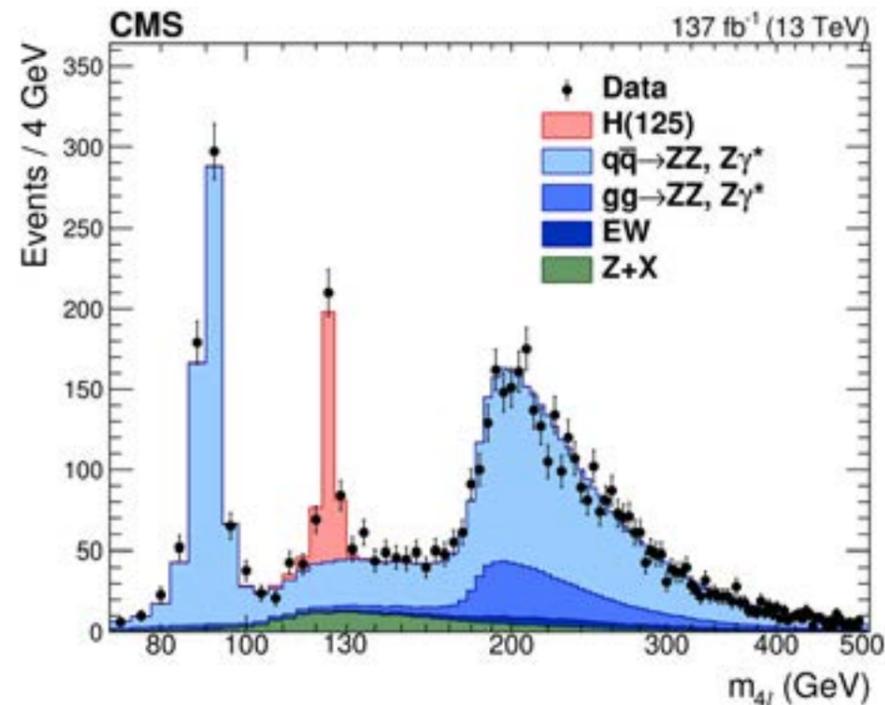


Figure 3 : Spectre de masse invariante reconstruite pour le canal de désintégration du boson H en 4 leptons dans l'expérience CMS avec les données du Run 2 au LHC.

au Run 1, on est passé à environ 200 pour la totalité du Run 2. Ce gain de statistique a permis de procéder à des analyses différentielles notamment au sein de l'approche *Simplified Template Cross Section*. Cette approche résulte des interactions entre la communauté des expérimentateurs et celle des théoriciens et permet une exploitation plus aisée des mesures pour ces derniers ; de plus elle facilite les comparaisons entre expériences.

Sous l'impulsion de R. Salerno, alors convenir du groupe Higgs, de Ch. Ochoa et d'Y. Sirois qui ont une

expertise reconnue de ce canal, le groupe a été l'acteur majeur des mesures différentielles dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$, conférant une grande visibilité aux doctorants et post-doctorants qui ont mené l'analyse.

La maîtrise des erreurs systématiques dans ce canal de grande précision est déterminante. Une approche améliorée du traitement des erreurs systématiques sur les efficacités de reconstruction et d'identification des électrons a été menée par C. Charlot : elle corrige le multi-comptage de certains effets et a conduit à réduire d'un facteur 2 l'incertitude

associée. Cette méthodologie est en cours de déploiement pour les muons. Par ailleurs, étant donné que dans ce canal, il y a toujours un lepton de moins de 10 GeV, la mesure des efficacités d'identification et de reconstruction pour ces derniers est particulièrement importante mais elle se révèle délicate. Des lots de données dédiés à la physique du b ont été utilisés afin d'effectuer ces mesures avec des $J/\psi \rightarrow ee$ en fonction de l'isolation et de rajouter des mesures entre 5 et 10 GeV.

Le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ permet une mesure remarquable : celle de la largeur du boson de Higgs. La prédiction du Modèle Standard pour la largeur totale (Γ_H) du boson de Higgs à 125 GeV est de $\Gamma_H = 4.1$ MeV. Cette valeur est de 3 ordres de grandeurs inférieure à la largeur apparente de la résonance observée dans les canaux de haute résolution en énergie (ZZ et $\gamma\gamma$). Elle semblait donc hors de portée avant que ne surgisse une idée nouvelle proposée en 2013 et rapidement mise en œuvre au LLR, basée sur la production du boson de Higgs hors de sa couche de masse. Cette dernière est directement reliée à la largeur du boson de Higgs, et permet alors une mesure de celle-ci. Cette méthode avait été mise en œuvre au LLR sur les données du Run 1. Cette analyse a été répétée au Run 2 pour donner la largeur intrinsèque $\Gamma_H = 3.2^{+2.4}_{-1.7}$ MeV, excluant la valeur nulle, et en accord avec le Modèle Standard. Cette seconde itération de l'analyse a fortement bénéficié des améliorations apportées à l'analyse, notamment au sein du LLR, et de l'augmentation de la statistique.

Depuis 2015, le groupe s'investit dans la recherche de production de paires de bosons de Higgs, seul canal permettant de caractériser le mécanisme de Higgs via la mesure du paramètre λ_{HHH} . La voie de désintégration en $bb\tau\tau$ qui offre un bon compromis entre efficacité et pureté a été choisie. Le groupe est à l'origine de la première publication Run 2 sur ce canal en 2016. Fidèle à sa stratégie consistant à identifier et améliorer des points clefs qui

déterminent la sensibilité d'une analyse, plusieurs développements importants ont été conduits au sein du groupe y compris en amont et pendant la prise de données. En particulier un travail de fond sur le déclenchement au niveau 1 sur les leptons tau τ ainsi que la mise au point d'un critère de déclenchement sur la fusion de bosons vecteurs (VBF) ont été réalisés. Pendant la prise de données et ultérieurement, un important travail de compréhension des données a été engagé, notamment du fait de la variabilité des conditions de prise de données au cours de l'ensemble du Run 2 et affectant la reconstruction des taus.

Compte-tenu du potentiel physique de ce canal, un effort considérable d'optimisation de la sensibilité des analyses HH en général et de $bb\tau\tau$ en particulier a été conduit par les acteurs principaux de ce canal, à savoir les groupes du LLR et celui de Pise. Ce canal a vu un déploiement spectaculaire de réseaux de neurones avancés, notamment un réseau de neurones convolutif pour l'identification des taus ; deux réseaux récurrents pour l'identification des jets de b et leur appariement et un réseau de neurones profond pour la classification dans la catégorie VBF. L'équipe du LLR a développé et validé le réseau de neurones profond utilisé comme estimateur final. De plus, elle a amélioré la modélisation des principaux bruits de fond QCD et $t\bar{t}$ à partir des données à l'aide de régions de contrôle.

Une autre contribution majeure du groupe a été l'introduction d'une catégorie VBF s'appuyant en partie sur les critères de déclenchement développés à cet effet. La topologie VBF est la seule qui a été sensible au couplage quartique $c_{2\nu}$ entre deux bosons de Higgs et deux bosons vecteurs. Une particularité importante de ce mode de production est que la section efficace varie très violemment au voisinage de la valeur prédite par le modèle standard. Cela a permis de placer la contrainte $0.67 < c_{2\nu} < 1.38$ ce qui, en excluant

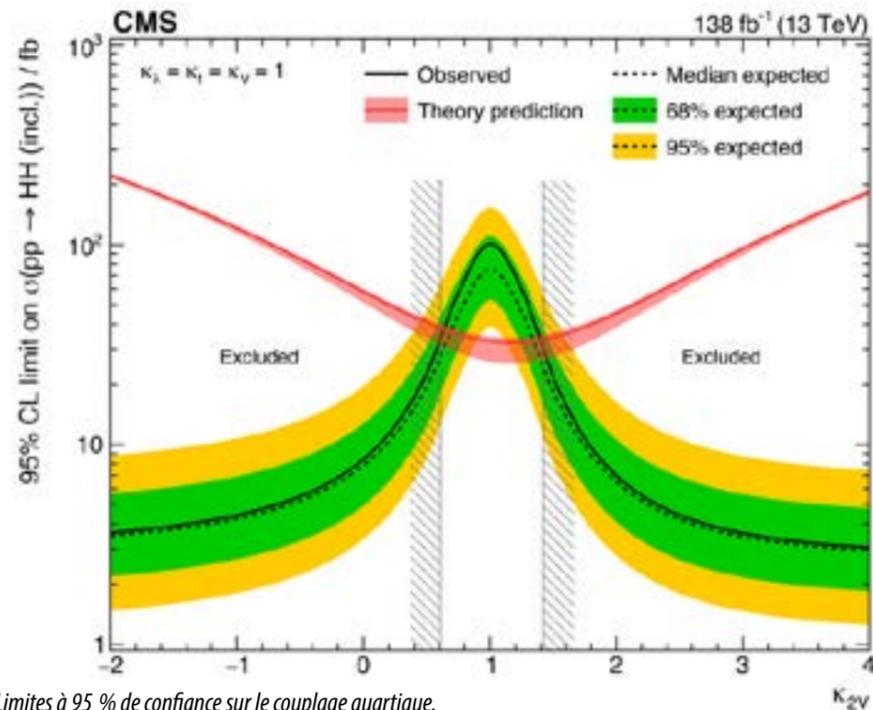


Figure 4 : Limites à 95 % de confiance sur le couplage quartique.

la valeur nulle (Figure 4), démontre l'existence du couplage quartique VVHH.

Le canal $bb\tau\tau$ s'est révélé le deuxième le plus sensible en attendu (5.2 SM) après le canal 4b mais le plus sensible en observé parmi tous les canaux de recherche du signal HH(4b, $bb\tau\tau$, $bb\gamma\gamma$, multilepton, $bbZZ$). La combinaison de l'ensemble de ces canaux conduit à la contrainte observée à 95 % de confiance $-1.24 < \kappa_\lambda < 6.49$ pour le facteur modificateur de l'auto-couplage.

Il convient de souligner la spectaculaire amélioration de la sensibilité dans le canal HH en l'espace de quelques années : typiquement à la fin du Run 1, il était considéré qu'au moment du démarrage du HL-LHC, la limite sur la production HH serait d'environ $10 \times$ SM. On est actuellement, avec une seule expérience à la moitié avec uniquement les données du Run 2. Il n'en demeure pas moins qu'il faudra la phase de haute luminosité pour la découverte, et que l'optimisation de la mesure de l'auto-couplage sera un champ de recherche à elle seule afin de décorréliser les deux diagrammes de production HH, celui en boîte qui fait

intervenir le couplage au quark top, et celui en triangle avec l'auto-couplage.

L'étude de l'auto-couplage est l'occasion d'une belle synergie entre les analyses $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ et HH. En effet, si le canal HH donne un accès assez direct de l'auto-couplage du boson de Higgs, les calculs NLO sur la production de $H \rightarrow ZZ^*$ montrent qu'une dépendance sur le paramètre d'auto-couplage est introduite, en premier lieu dans le spectre d'énergie transverse du boson de Higgs. L'encadrement obtenu à 95 % de confiance est $-5.4 < \kappa_\lambda < 15.9$. S'il n'est pas aussi précis que celui obtenu dans le canal HH, les ordres de grandeur ne sont pas si différents et on attend beaucoup de la confrontation et/ou combinaison des deux méthodes.

Si l'étude du secteur scalaire est au cœur des activités d'analyse du groupe, il n'est pas le seul. Les mesures dans les canaux multibosons dont l'observation de la production de trois bosons massifs font également partie de la palette des activités du groupe. Un intérêt particulier pour les topologies VBF et l'étude de la diffusion de bosons vecteurs (VBS) se

dégage au sein du groupe et a donné lieu à plusieurs thèses. L'intérêt pour les topologies VBS/VBF se retrouve également dans la mise au point de critères de déclenchement innovants décrits dans le paragraphe suivant. Cette thématique est en totale cohérence avec l'implication dans le projet HGAL qui jouera un rôle déterminant dans la reconstruction des jets VBS/VBF.

Le Run 3 a commencé en 2022 et 70 fb^{-1} ont été accumulés. Le groupe du LLR continue à prendre part à plusieurs éléments clés de la prise de données. Il continue, via A. Zgiche, d'assurer le bon fonctionnement des cartes TCC qui depuis le Run 1 gèrent le déclenchement du ECAL. En 2023, 36 % des shifts ECAL-trigger ont été assurés par des membres du groupe. De même, les membres de la composante ions lourds du groupe sont fortement mobilisés lors des Runs PbPb du LHC et M. Nguyen est responsable de cette prise de données.

Par ailleurs, les membres du groupe continuent d'optimiser la qualité des objets de niveau 1 sur lesquels sont basés les déclenchements électromagnétiques et ceux sur les taus. De plus, une technique innovante de calibration des calorimètres à base de réseaux de neurones profonds entraînés sur les données est en cours de finalisation. Enfin, sous l'impulsion d'O. Davignon et d'A. Zabi, des systèmes innovants de prise de données ont été mis en place. Il s'agit de la stratégie de "parking" : en mettant à profit l'énorme bande passante du HLT qui peut enregistrer des données à plusieurs kHz, des critères de déclenchement visant, par exemple, le mode production VBF du boson de Higgs sont appliqués au Level 1 et au HLT. Les données recueillies sont mises de côté et sont reconstruites de façon opportuniste, par exemple quand le processing des lots de données prioritaires est terminé. Pour le VBF parking, le gain en acceptation est de l'ordre de 20 % pour des valeurs de $m_{jj} > 2 \text{ TeV}$ et dépasse 300 % pour $m_{jj} < 1 \text{ TeV}$.

Ainsi, poursuivant dans une stratégie qui avait fait la force du groupe et qui avait conduit à sa contribution majeure à la découverte du boson de Higgs en 2012, le groupe CMS s'est évertué à maintenir une démarche cohérente. Cohérence dans les thèmes d'analyse qui s'articulent autour du mécanisme de Higgs, d'une part dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ et d'autre part dans l'analyse $HH \rightarrow bb\tau\tau$ qui, en contribuant à la découverte de la production HH et à la preuve de l'autocouplage, sera indubitablement un sujet majeur au HL-LHC. La diffusion WW par VBS, qui sera également pleinement pertinente dans la phase haute-luminosité s'inscrit également dans le cadre de l'étude de la brisure spontanée de la symétrie électrofaible. Sur le chemin de l'étude du boson de Higgs, le Run 3 en cours va marquer un jalon important avec possiblement l'observation du couplage du boson de Higgs à la deuxième famille de fermions.

Cohérence également dans la façon d'aborder les analyses en s'efforçant de maîtriser l'intégralité de la chaîne d'analyse : du détecteur, de son système de déclenchement aux techniques de reconstruction et d'analyse en déployant les technologies les plus innovantes, parmi lesquelles le Machine Learning qui a connu une expansion spectaculaire.

Cette démarche trouve d'ailleurs son prolongement dans l'implication du groupe dans les algorithmes du système de déclenchement et à ceux de la reconstruction hors-ligne pour HGAL qui viennent compléter l'engagement dans la mécanique du détecteur qui confère une très grande visibilité du laboratoire au sein du projet.

Cette triple cohérence dans les activités du groupe CMS a vraisemblablement sa part dans le fait que le groupe a été rejoint par d'excellents étudiants et post-doctorants ainsi que par trois jeunes physiciens permanents dans la période écoulée. Elle aura de plus permis à plusieurs membres du groupe d'occuper

des responsabilités importantes dans la collaboration et à d'autres de recevoir des prix prestigieux.

3.1.3 Caractérisation du boson de Higgs par le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$ leptons

Au cours de la décennie écoulée, le groupe CMS du LLR a joué un rôle majeur dans une majorité des mesures exploitant la désintégration du boson de Higgs en deux bosons Z se désintégrant à leur tour en paires d'électrons ou de muons, canal désigné par $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4$ leptons ($H \rightarrow 4l$). Ce canal de désintégration fut l'un des principaux canaux de découverte du boson de Higgs et demeure aujourd'hui un canal majeur d'étude au LHC. Malgré son faible rapport de branchement (0.01240 % pour un boson de Higgs SM de 125 GeV), il a été avec $H \rightarrow \gamma\gamma$ le plus sensible pour la découverte, grâce à trois atouts :

1. La reconstruction complète de l'état final, qui fournit la masse invariante des quatre leptons, m_{4l} , très discriminante, ainsi que de puissantes informations angulaires ;
2. L'excellente résolution en énergie et en direction des électrons et des muons, qui rend étroit le pic de résonance dans la distribution m_{4l} ;
3. Un rapport signal/bruit de fond élevé, typiquement de l'ordre de 2 pour 1 dans une fenêtre de 5 GeV autour du pic de la résonance.

Le groupe a joué un rôle majeur dans la découverte du boson de Higgs, via sa contribution décisive au canal $H \rightarrow 4l$. Ce succès résulte d'une stratégie de longue date et le choix de se focaliser sur ce canal a déterminé beaucoup d'activités du groupe dans les années qui ont précédé le démarrage du LHC. On peut citer la contribution à la mécanique du calorimètre électromagnétique, l'implication dans les algorithmes de déclenchement pour les électrons et les photons, la conception d'une stratégie de reconstruction des électrons en particulier à bas moment transverse, et également une anticipation des moyens de stockage et de calculs au sein d'une

infrastructure Tier 2 et Tier 3 hébergée au laboratoire.

Après sa découverte, le canal $H \rightarrow 4l$ a joué un rôle clé dans les mesures des propriétés du boson de Higgs. Les paramètres suivants ont été mesurés ou contraints en utilisant soit les données du Run 1 ou du Run 2 du LHC, soit une combinaison des deux : la masse du boson, les paramètres modificateurs de couplage, définis comme le rapport entre les sections efficaces observées du boson de Higgs (inclusives ou exclusives par mode de production) et l'attendu du modèle standard, ses nombres quantiques de spin-parité, sa largeur de désintégration (avec une borne supérieure peu contraignante obtenue par une méthode directe, et une mesure obtenue par une méthode indirecte), les sections efficaces de production *fiducielles*¹ (à la fois intégrées et différentielles en fonction de variables cinématiques), ainsi que les possibles contributions anormales à la structure tensorielle de l'interaction entre le boson de Higgs et les bosons vecteurs du modèle standard.

Les membres du groupe ont contribué à ces mesures et aux analyses correspondantes à tous les niveaux : stratégie, sélection des objets et des événements, contrôle du bruit de fond et interprétation statistique. Sur le plan éditorial, l'édition ou les revues des articles et des documents publics de ces analyses ont compté parmi les responsabilités du groupe.

Mesure de la masse du boson de Higgs

La masse du boson de Higgs (m_H) est le paramètre non prédit qui détermine complètement le secteur de Higgs dans le modèle standard (SM). Pour mesurer m_H précisément au LHC, nous nous appuyons principalement sur les canaux sensibles et à haute résolution de masse,

¹ Une section efficace fiducielle est une section efficace mesurée dans le domaine angulaire correspondant au volume fiduciel du détecteur, c'est-à-dire le volume actif optimisé pour la mesure des particules.

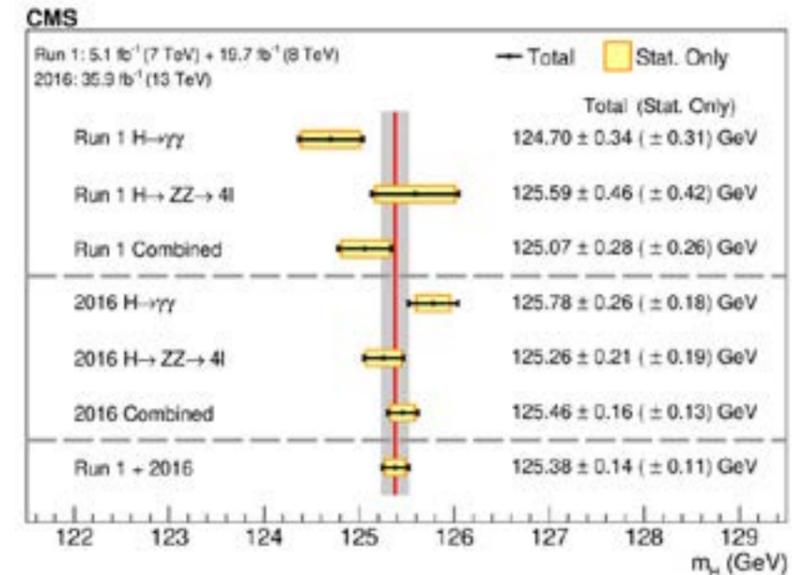


Figure 5 : Mesures individuelles et combinées de la masse du boson de Higgs avec les canaux de précision $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ et $H \rightarrow \gamma\gamma$ avec les données de 2016 et de la première période de prise de données du LHC (Run 1).

à savoir $H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow 4l$.

La mesure la plus précise de la masse du boson de Higgs dans le canal $H \rightarrow 4l$ a été réalisée² en utilisant 35.9 fb^{-1} de la luminosité intégrée du Run 2 du LHC. Par rapport à la mesure précédente effectuée avec les données du Run 1, pour améliorer la résolution de la masse invariante des quatre leptons, un ajustement cinématique est effectué en utilisant une contrainte de masse sur la résonance Z. Le résultat de la mesure de masse est obtenu à partir de l'ajustement 3D basé sur la masse invariante des quatre leptons, les incertitudes de masse événement par événement et le discriminant cinématique pour la séparation du signal et du principal bruit de fond. La valeur ajustée de m_H dans les trois sous-canaux est $m_{4\mu} = 124.94 \pm 0.25$ (stat.) ± 0.08 (syst.) GeV, $m_{4e} = 124.37 \pm 0.62$ (stat.) ± 0.38 (syst.) GeV, et $m_{2e2\mu} = 125.95 \pm 0.32$ (stat.) ± 0.14 (syst.) GeV conduisant à une valeur combinée $m_H = 125.26 \pm 0.19$ (stat.) ± 0.08 (syst.) GeV. L'incertitude systématique dans la mesure de la masse est entièrement dominée par celle liée à la calibration de l'impulsion des leptons.

² CMS Collaboration, Measurements of properties of the Higgs boson decaying into the four-lepton final state in pp collision at $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$, JHEP 11 (2017) 047.

La compatibilité mutuelle des résultats des trois canaux individuels, définie comme la valeur p asymptotique de l'ajustement, est de 2.5 %. La légère tension entre les trois canaux individuels est due à la différence entre les canaux 4μ et $2e2\mu$.

La mesure de masse obtenue dans le canal $H \rightarrow 4l$ est combinée avec celle effectuée dans le canal de désintégration $H \rightarrow \gamma\gamma$ en utilisant les ensembles de données du Run 1 et de 2016. Le résultat de la combinaison des mesures est $m_H = 125.38 \pm 0.11$ (stat) ± 0.08 (syst) GeV avec une incertitude statistique attendue de ± 0.13 GeV et une incertitude systématique attendue de ± 0.08 GeV. Un résumé des mesures individuelles et combinées avec les ensembles de données du Run 1 et de 2016 est présenté dans la Figure 5. Il s'agit actuellement de la mesure la plus précise de la masse du boson de Higgs. L'équipe du LLR a joué un rôle clé dans ces mesures avec le canal $H \rightarrow 4l$, en particulier dans la détermination de la calibration des électrons et la détermination d'incertitudes associées à la calibration des leptons événement par événement.

Mesure de la largeur de désintégration du boson de Higgs

Le boson de Higgs (H) se désintègre rapidement avec un grand nombre de canaux de désintégrations possibles ouvertes à la masse de 125 GeV. Son temps de vie moyen, trop court pour être observable, se traduit par une indétermination de sa masse, ou largeur intrinsèque de désintégration (ou simplement 'largeur') reliée à l'ensemble de ses modes de désintégrations, visibles ou invisibles. Pour une masse donnée du boson H, la largeur est une propriété fondamentale prédite par le Modèle Standard (SM). La mesure de la largeur de désintégration est très importante, car elle permet de contraindre les couplages du boson H à de nouvelles particules qui ne seraient pas visibles, telles que les particules massives et neutres de matière noire qui apparaissent dans des modèles au-delà du SM.

La prédiction du SM pour la largeur totale (Γ_H) du boson de Higgs à 125 GeV est de

$\Gamma_H = 4.1$ MeV. Cette valeur est de 3 ordres de grandeurs inférieure à la largeur de la résonance dans les canaux de haute résolution en énergie (ZZ et $\gamma\gamma$). L'idée³ mise en œuvre sous l'impulsion du LLR est d'exploiter la production du H hors couche de masse. La production hors couche de masse est en général faible, mais, dans le cas particulier du boson de Higgs se désintégrant en ZZ, la présence non loin de la masse du H du seuil de production de deux bosons faibles $pp \rightarrow ZZ$ conduit à une augmentation importante de la production hors couche de masse du boson de Higgs, qui contribue au final à environ 10 % de la production totale. Le taux de production hors couche de masse est indépendant de la largeur du boson de Higgs, cette mesure combinée avec celle du taux de production sur la couche de masse permet d'obtenir une mesure de la largeur du boson de Higgs.

Les contraintes obtenues dans la première analyse du Run1 étaient 100 fois plus précises que la mesure directe sur la couche de masse. La combinaison du canal en 4 leptons ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$) avec le canal en 2 leptons et 2 neutrinos ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2l2\nu$), ainsi que l'augmentation de la statistique a ensuite permis d'améliorer la contrainte et d'atteindre une sensibilité comparable à la largeur attendue dans le SM. La mesure présentée⁴, qui utilise l'ensemble des données du Run 2 à l'énergie dans le centre de masse de 13 TeV, permet d'établir une évidence pour la production hors couche de masse du boson de Higgs en combinant les analyses effectuées dans les canaux $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ et $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2l2\nu$, ainsi qu'une mesure de la largeur du boson de Higgs par la combinaison de la mesure hors couche de masse avec la mesure sur la couche de masse.

³ F. Calo and K. Melnikov, *Constraining the Higgs boson width with ZZ production at the LHC*, Phys. Rev. D 88, 054024 (2013)

⁴ CMS Collaboration, *Measurement of the Higgs boson width and evidence for its off-shell contributions to ZZ*, Nature Phys. 18, 1329-1334 (2022).

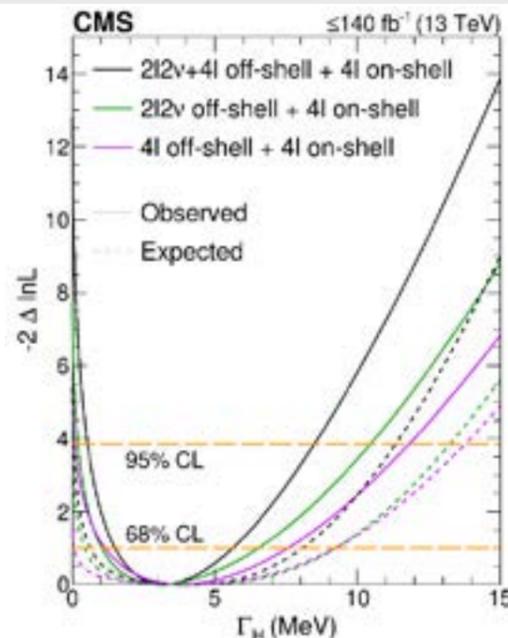


Figure 6 : Variation de la différence du logarithme du rapport de vraisemblance issu de l'ajustement combiné des données dans la région de production hors couche de masse et sur la couche de masse. La valeur du minimum, correspondant au meilleur ajustement des données, est de 3,2 MeV. Les intervalles de confiance à 1 et 2 écarts standards sont également représentés.

Le taux de production du Higgs à une masse supérieure à $2m_Z$, relatif au taux attendu dans le SM est contraint dans l'intervalle [0.0061, 2.0] à 95 % de confiance. Un scénario sans production du Higgs hors couche de masse est exclu à 99.97 % de confiance (3.6 déviations standards). La largeur de désintégration du boson de Higgs mesurée est de $\Gamma_H = 3.2^{+2.4}_{-1.7}$ MeV, en accord avec la prédiction du SM de 4.1 MeV (Figure 6).

Sections efficaces différentielles

La mesure de sections efficaces différentielles de production du boson de Higgs en fonction des variables cinématiques permet de caractériser la production et la désintégration et de tester les prédictions du modèle standard. Le groupe du LLR a également joué un rôle clé dans l'obtention des premières mesures de sections efficaces différentielles après déconvolution des effets liés au détecteur. Les sections efficaces différentielles ont été mesurées⁵ avec les données du Run 2 en fonction de l'impulsion transverse, de la rapidité du boson de Higgs, du nombre de jets dans l'événement ainsi que des caractéristiques cinématiques de ces jets et de l'ensemble des observables permettant de caractériser la désintégration $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$.

3.1.4 Un calorimètre haute granularité pour CMS

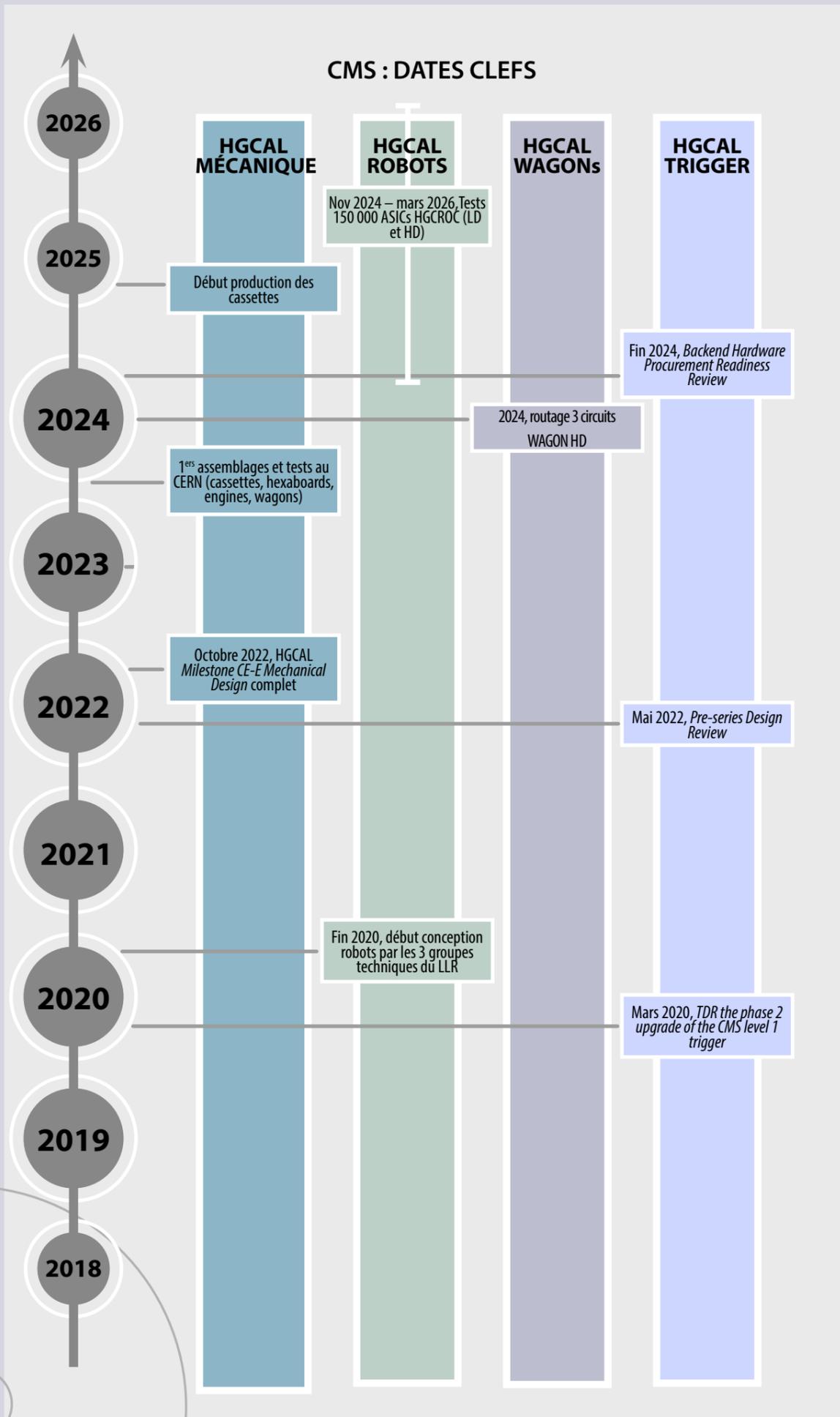
La prise de données en cours, le Run 3 du LHC, devrait permettre d'accumuler 450 fb^{-1} de collisions pp à une énergie dans le centre de masse de 13.6 TeV d'ici la fin de l'année 2025. Elle sera suivie du 3^{ème} "Long Shutdown" (LS3) qui verra la mise en place, aussi bien au niveau de l'accélérateur que des détecteurs, de tous les éléments nécessaires à la phase de Haute Luminosité du LHC (HL-LHC) dont le démarrage est prévu en 2029. La phase HL-LHC prévoit une luminosité

⁵ CMS Collaboration, *Measurements of inclusive and differential cross sections for the Higgs boson production and decay to four-leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, JHEP 08 (2023) 040.

instantanée de $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ avec l'objectif d'accumuler jusqu'à 3000 fb^{-1} durant la décennie qui suivra.

Les enjeux de physique du HL-LHC sont nombreux et cruciaux; parmi ceux qui intéressent particulièrement les physiciens du LLR, on peut en citer quelques-uns dans le secteur scalaire: la détermination du paramètre d'autocouplage du boson de Higgs qui permet de sonder le mécanisme de la brisure de la symétrie électrofaible; l'étude du phénomène de diffusion des bosons W longitudinaux qui est régularisé par la présence du boson de Higgs. Par ailleurs, le HL-LHC permettra d'améliorer la précision des mesures des couplages du boson de Higgs, notamment avec les fermions de deuxième famille.

L'accroissement d'un facteur 2 à 4 de la luminosité instantanée pour HL-LHC s'accompagne d'une augmentation du nombre d'événements empilés (*pile-up*, PU), qui pourra atteindre jusqu'à 200 événements par croisement. La quantité du PU ainsi que l'objectif de luminosité intégrée du HL-LHC posent des contraintes très fortes sur les détecteurs. Les calorimètres actuels de CMS à cristaux de PbWO4 des embouts ont été conçus pour supporter une luminosité intégrée d'environ 500 fb^{-1} , au-delà de cette valeur, les performances sont très dégradées. Ainsi, durant le LS3, c'est pratiquement un nouveau détecteur qui sera mis en place dans CMS tant les améliorations sont nombreuses et importantes: remplacement intégral du trajectographe avec une couverture angulaire jusqu'à une pseudo-rapidité de 3.8 et doté de la capacité de contribuer au déclenchement de niveau 1, ce dernier étant lui-même complètement renouvelé; remplacement de l'électronique de Front-End dans la partie centrale du calorimètre électromagnétique; augmentation de la couverture angulaire du détecteur à muons; ajout d'un nouveau détecteur de mesure de temps des mips (MTD) en amont des calorimètres; et enfin le



remplacement intégral des calorimètres embouts qui seront remplacés par une nouvelle génération de détecteurs haute-granularité, HGCAL.

Il se trouve que l'étude de la brisure de la symétrie électrofaible, qui est au cœur des thématiques du groupe CMS du LLR conduit à se focaliser sur la physique "à l'avant", que ce soit la diffusion de bosons vecteurs (VBS), la production de bosons de Higgs par VBF ou encore l'étude de l'auto-couplage du Higgs via la production HH. En effet, les diagrammes en triangle faisant intervenir l'auto-couplage, conduisent à une production de bosons de Higgs majoritairement vers l'avant, d'où la forte cohérence avec le projet de remplacement des calorimètres bouchons. Les contraintes techniques pour les nouveaux calorimètres sont significatives. Ils doivent être denses pour tenir dans le volume des calorimètres actuels et garder des gerbes compactes. Une bonne tenue aux radiations (la dose déposée atteindra par endroit 2 MGy) est requise. Afin de minimiser l'impact des 200 événements de PU, une grande segmentation transverse est nécessaire, et une mesure précise du temps d'arrivée des particules contribuera à rejeter les particules issues du PU. Enfin, ce

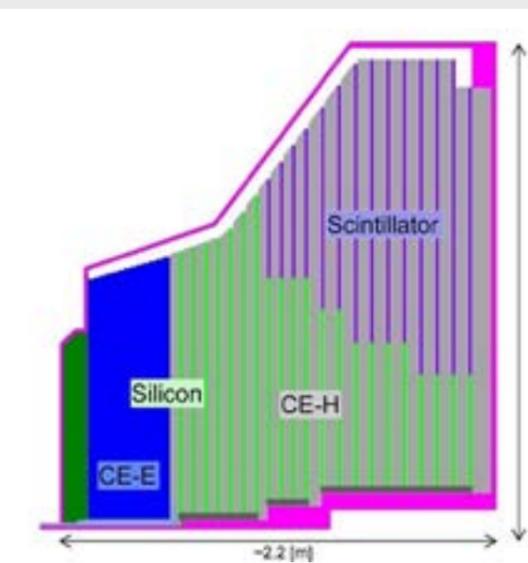


Figure 7 : Demi-coupe d'un des deux embouts de calorimétrie haute-granularité HGCAL. La projection est montrée ici dans un plan parallèle à l'axe des faisceaux de protons.

détecteur doit contribuer efficacement au déclenchement.

Pour répondre à ces défis, le choix a été fait d'un calorimètre à échantillonnage de haute granularité (6 millions de voies) (Figure 7), utilisant, pour les mesures, du silicium et des scintillateurs lus par des SiPM. C'est majoritairement du plomb qui est utilisé comme absorbeur. La tenue aux radiations du silicium conduit à opérer ce détecteur à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. La partie électromagnétique (CE-E) comporte 26 couches pour un total de $27 X_0$ et 1.5λ et la partie hadronique (CE-H) 21 couches pour environ 8.5λ . Les cellules ont une forme hexagonale de surface $\sim 0.5\text{ cm}^2$ dans la partie haute densité (HD) la plus près de l'axe du faisceau et $\sim 1\text{ cm}^2$ ailleurs. Elles sont disposées sur des "hexaboards".

De plus, du fait de l'expérience de longue date acquise au LLR sur la calorimétrie haute granularité dans le cadre des collisionneurs e^+e^- , le laboratoire fut naturellement l'un des initiateurs du projet au sein de la collaboration CMS. Un financement du Labex P2IO a permis un lancement efficace de l'activité HGCAL au laboratoire et c'est donc naturellement que le groupe CMS a pris des responsabilités majeures dans le projet :

- Le LLR est responsable de la fourniture de 180 plaques de cuivre constituant simultanément sa structure mécanique et le média de son refroidissement. Dans ces plaques sont en effet soudés des tubes permettant la circulation de CO_2 diphasique. Il conçoit et fournit en outre plusieurs éléments mécaniques assurant la rigidité du détecteur ainsi que plusieurs éléments d'outillage permettant sa construction.
- Le LLR est partie prenante dans l'élaboration du système de déclenchement. Les études conduites ont contribué aux choix de design du système et l'équipe CMS est responsable du plusieurs blocs clefs du firmware.
- L'ASIC en charge de la lecture des capteurs en silicium d'une part et des SiPM d'autre part, HGCROC, a été conçu par

OMEGA et le LLR est en charge du test de l'intégralité des 120 000 chips. Pour ce faire, deux robots ont été imaginés et construits pendant que les performances de l'ASIC et sa tenue aux radiations ont été étudiées conjointement dans les deux laboratoires.

- Le LLR contribue au design d'un PCB, appelé wagon, permettant la connexion de plusieurs hexaboards entre elles et permettant d'extraire les mesures et les informations de déclenchement.
- Enfin, les membres de l'équipe CMS contribuent à l'élaboration des algorithmes de reconstruction qui, en exploitant les fantastiques capacités d'HGCAL, doivent permettre une efficacité optimale en minimisant l'impact de l'empilement.

Mécanique

L'élément central du CE-E est appelé *cassette*. Celle-ci est constituée d'une plaque de cuivre (Cu) d'environ 1 500 mm

x 1500 mm x 6 mm sur laquelle sont fixés de part et d'autre les modules contenant le Silicium ainsi que l'électronique de lecture. Des tuyaux en acier inox dans lesquels circule le CO₂ diphasique sont intégrés dans la plaque ; celle-ci sert donc d'échangeur thermique. Il y a six cassettes par plan et chaque calorimètre bouchon est constitué de treize plans. Lors du montage, à l'horizontal, les cassettes sont attachées en périphérie extérieure par des pièces d'interconnexion, qui reprennent aussi les efforts en hauteur, et appelées "z-bar". Les cassettes sont aussi attachées en périphérie interne à un cône en aluminium qui va reprendre une partie des efforts une fois le calorimètre installé dans sa position verticale. Des plaques de plomb servant d'absorbent sont intercalées entre chaque plan de cassettes. Le CE-E est attaché à une plaque arrière en acier inox servant de premier absorbent du CE-H. La plaque de Cu, ainsi que les pièces mécaniques évoquées, composent la structure



Figure 8 : Prototype de plaque de refroidissement en cuivre de HGCAL réalisée au sein du LLR, avant sa livraison au CERN.

mécanique du CE-E dont la conception et la réalisation sont la responsabilité des équipes du LLR et du CERN. Les cassettes du CE-E sont assemblées et testées dans le centre d'assemblage du CERN (CAC).

Le LLR a été fortement impliqué dans la conception et le prototypage des plaques de Cu, des pièces de fixation des modules ("spacers"), des z-bars ainsi que d'une série d'outillages pour manipuler les cassettes ou assembler le détecteur final. L'atelier du LLR a subi une cure de jouvence majeure au cours des cinq dernières années, avec l'achat de nombreuses machines modernes : tour 5 axes, fraiseuse de grande dimension, machine à mesurer tridimensionnelle, machine de traction. L'acquisition de ces machines a permis une grande montée en compétences de l'atelier et la réalisation de plusieurs itérations de pièces complexes comme les prototypes de *spacers* ou de z-bars. La conception finale de ces dernières a été validée en 2023 tandis que des dernières optimisations sont toujours en cours pour les *spacers*, notamment en vue de réduire les coûts de production.

Au cours de ces années, une attention toute particulière a été portée à la conception des plaques de Cu, la pièce la plus complexe en raison de contraintes fortes sur les tolérances d'épaisseur (+/- 0.1 mm), de planéité (pas de variante locale d'épaisseur supérieure à 0.1 mm sur une distance de 200 mm) ou de localisation des 200 trous pour les "spacers" (+/- microns). Après des premières réalisations dans l'industrie permettant de valider la faisabilité des précisions d'usinage, il a été décidé qu'il serait plus économique de réaliser l'ensemble des plaques en interne. Un travail de fond a ensuite été engagé afin de définir les propriétés exactes du Cu (nuance, dureté,...) respectant toutes les contraintes nécessaires au bon fonctionnement du détecteur. En parallèle, de nombreuses études ont été menées pour définir (colle thermique ou soudure) et valider (traitement de

surface des tuyaux, application d'un flux, quantité d'étain,...) la procédure finale d'intégration des tuyaux à l'aide d'une soudure basse température sous vide.

Un premier prototype fabriqué intégralement au LLR et accompagné de son lot de spacers a été livré au CERN en juin 2023 (Figure 8). Il a servi, avec succès, aux tests de montage des modules et de câblage. De plus, deux outillages ont été conçus et réalisés au sein du service mécanique du LLR : un bras robotique équipé d'un palonnier à ventouses pour attraper les plaques sans les déformer (Figure 9) ainsi qu'un "chevalet" permettant leur déplacement de poste en poste au sein de l'atelier. La conception de ces outils sert de base de travail aux outillages d'assemblage et de manutention des cassettes au CAC. En outre, un prototype d'outillage à échelle réduite permettant d'assembler le détecteur final a également été produit au LLR et testé avec succès. Son extension à la taille finale du détecteur est en cours. L'année qui vient verra le passage d'une période de prototypage à la production des différentes pièces, et notamment les plaques de refroidissement qui seront intégralement réalisées au sein de l'atelier mécanique du LLR et livrées au CERN.

Déclenchement

Le détecteur HGCAL fournira des informations au système de déclenchement de niveau 1 (L1) de CMS, qui reçoit et combine les informations de l'ensemble des sous-détecteurs de CMS dans le but de décider en temps réel si les données de chaque événement de collision doivent être envoyées au système d'acquisition. Ces informations sont appelées primitives de déclenchement (trigger primitives, TP) et le système électronique qui les produit est appelé générateur de primitives de déclenchement (*trigger primitive generator*, TPG). Le système TPG du détecteur HGCAL est constitué de plusieurs étages de traitement fonctionnant à une fréquence d'entrée de

40 MHz, la fréquence de collision au LHC. Une partie du traitement se trouve sur le détecteur et fait partie de l'électronique frontale, tandis qu'une seconde partie se trouve hors du détecteur au sein de l'électronique dorsale. Le traitement frontal s'effectue au sein de deux ASICs, le HGCROC et l'ECON-T, tandis que le traitement dorsal s'effectue dans deux étages successifs (appelés Stage 1 et

Stage 2) constitués de cartes au format ATCA dotées de FPGAs, l'ensemble étant interconnecté par des liens optiques rapides. Une vue d'ensemble du système TPG est illustré à la **Figure 10**.

Il est important de noter que les nœuds de traitement au sein des étages successifs couvrent des régions du détecteur de plus en plus grandes, depuis une fraction de module pour



Figure 9 : Palonnier avec plaque de cuivre pour la mise en position sur la table chauffante.

un ASIC HGCROC jusqu'à un secteur de 120 degrés complet pour un FPGA du Stage 2. En parallèle, les données qui transitent deviennent de plus en plus compressées. Ainsi la granularité est tout d'abord réduite au sein du HGCROC via la formation de cellules de déclenchement à partir des cellules de base du détecteur, ainsi que via la compression de l'énergie des cellules de déclenchement par un encodage en point flottant. L'ASIC ECON-T réduit par la suite la quantité de données de manière plus importante via différents algorithmes de compression configurables. Le Stage 1 a quant à lui un rôle de reformatage et de préparation des données pour le Stage 2. Au sein de ce dernier sont construites les primitives de déclenchement proprement dites : ce sont principalement des agrégats de cellules de déclenchement en trois

dimensions. La position, l'énergie et des informations sur la forme interne de ces agrégats sont envoyées au système L1 central de CMS.

Le LLR a été impliqué entre 2018 et 2023 sur l'ensemble de la chaîne de traitement décrite ci-dessus, à la fois sur des développements *firmware* et sur des développements de simulation et d'étude de performance. Il a ainsi tout d'abord contribué en 2018 à la simulation et à l'étude des performances de la compression des cellules de déclenchement au sein du HGCROC, en collaboration avec le laboratoire OMEGA voisin⁶. Il a par ailleurs contribué de manière significative au choix et à l'implémentation des algorithmes de réduction de données au sein de l'ASIC

⁶ OMEGA est un centre de design de microélectronique de l'IN2P3 situé sur le campus de l'École polytechnique.

ECON-T jusqu'à l'été 2020. Les études de simulation qui ont permis de sélectionner, par leurs performances, un nombre réduit d'algorithmes à implémenter ont été en grande partie effectuées au LLR. De plus, un des algorithmes retenus par le projet HGCAL et implémenté dans l'ECON-T a été effectivement développé au LLR. La méthodologie de développement choisie pour cet algorithme a d'ailleurs été particulièrement novatrice, avec une utilisation de la synthèse de haut niveau (HLS) qui a permis un prototypage et un processus de développement grandement accélérés.

Le LLR a aussi contribué à un grand nombre d'aspects du système dorsal, à la fois sur le Stage 1 et sur le Stage 2. D'un point de vue *firmware* il a la responsabilité, depuis 2020, du développement d'un bloc du Stage 1 qui traite et regroupe les données des cellules de déclenchement reçues des ASICs ECON-T. Une première version a été finalisée en 2022 et une seconde version est en cours de développement depuis. Le système nécessitant 14 bitstreams différents pour les différentes cartes constituant le Stage 1, un procédé de génération automatisée basé sur des modèles (*templates*) de

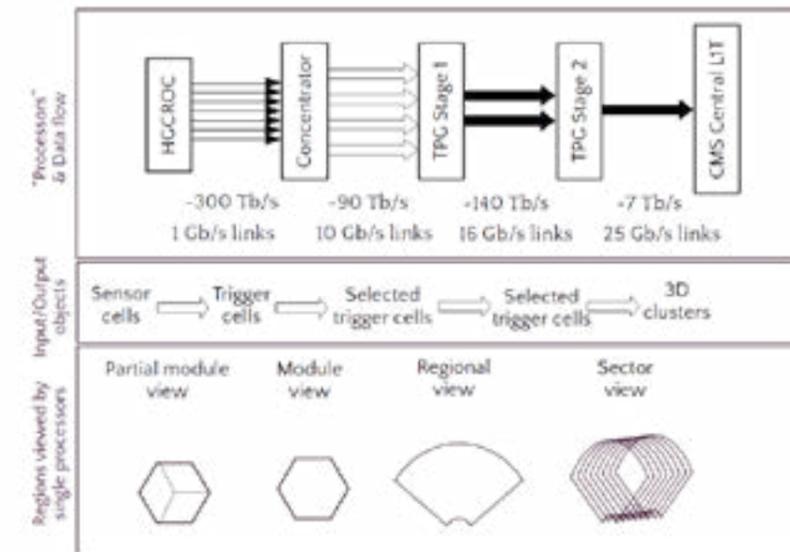


Figure 10 : Schéma du système de génération des primitives de déclenchement (TPG) pour CMS à HL-LHC.

code a été développé, accompagné de procédures de vérification automatique du code généré. Du point de vue de la simulation, de nombreuses études de performance et d'optimisation ont été effectuées sur différentes étapes de la chaîne algorithmique de reconstruction des primitives de déclenchement. Les études se sont en particulier focalisées sur la reconstruction des électrons, photons et leptons tau. Des travaux d'optimisation ont couvert un vaste champ de paramètres liés à la

reconstruction de l'énergie des particules et à leur identification par des méthodes multivariées. Enfin, le LLR a aussi été un acteur majeur du développement du *framework* de simulation du système TPG d'HGCAL. Ce framework inclut un système de validation automatisée de code qui a été entièrement développé au LLR à l'aide d'outils d'intégration continue.

Dans l'année qui vient, le projet va passer d'une phase de prototypage à une phase de production. En particulier, les cartes



Figure 11 : À gauche : Puce HGCROC HD de taille 17.0 × 8.0mm. Au centre : Puce HGCROC LD de taille 20.0 x 16.8 mm². À droite : "Socket" servant à connecter les puces HD au banc de test.

du système dorsal seront produites entre fin 2024 et début 2026. Dans le but de valider ses fonctionnalités avant cette phase de production, le système sera passé en revue à l'été 2024, à la fois du point de vue du *hardware*, du *firmware* et de ses performances.

Tests HGCROC

La puce HGCROC est un circuit intégré dédié de micro-électronique développé spécifiquement par OMEGA (en collaboration avec d'autres instituts de CMS, dont le CERN, le CEA-Saclay et AGH-Krakow) pour la lecture des 6 millions de voies d'HGCAL. Il y aura 120 000 puces HGCROC dans HGCAL. La puce HGCROC est encapsulée dans un substrat de plastique, appelé package, qui facilite la soudure sur circuits imprimés. Les puces

sont ensuite collées sur les senseurs et assemblées dans HGCAL. Il existe deux packages de tailles différentes : le plus petit est appelé "haute densité" (HD = *high density*) tandis que le plus grand est appelé "basse densité" (LD = *low density*), comme indiqué sur la Figure 11. HD et LD ont pour vocation d'être assemblés sur des circuits imprimés dont la taille des cellules diffère. Dans HGCAL, il y aura environ 80 000 puces HGCROC LD et 40 000 puces HGCROC HD.

Dans ce cadre, le LLR est responsable du contrôle qualité des puces HGCROC après production et encapsulation. Le contrôle qualité des 120 000 HGCROC est une étape cruciale, HGCROC étant le premier composant actif de la chaîne d'acquisition et de la chaîne



Figure 12 : Photo d'un des deux robots du LLR pour les tests de production de puces électroniques.

de déclenchement d'HGCAL. Il s'agit d'un circuit extrêmement sophistiqué, coûteux, qui est le fruit d'années de travail des ingénieurs. Après installation, il sera impossible de remplacer des HGCROC défectueux. C'est pourquoi il est impératif de garantir qu'aucune puce HGCROC ne satisfaisant pas des critères stricts de qualité ne sera assemblée dans HGCAL. Du fait du grand nombre de puces à tester (>120 000), le LLR, en collaboration avec OMEGA, a conçu et construit deux plateformes de tests automatisés de la qualité d'HGCROC, centrées autour de robots. Un des robots est visible sur la Figure 12. Ces robots ont été conçus et réalisés entièrement au laboratoire, sur la base de deux fraiseuses reconverties. Les mouvements et les tests sont supervisés par un pc.

Une fois une puce insérée dans un "socket" (un logement spécial permettant de connecter électroniquement la puce à un circuit, visible à la Figure 11) monté sur un circuit imprimé dédié aux tests d'HGCROC appelé "carte de test", les tests de contrôle qualité de cette puce peuvent être lancés par le PC. La prise des données correspondante est réalisée à travers une chaîne d'acquisition composée de la carte de test, d'un HexaController (un circuit imprimé dédié composé d'un réseau de portes programmables in situ – un FPGA – et d'un microprocesseur, qui communique directement avec HGCROC), et du PC. Les données collectées sont ensuite analysées par le PC, et les puces sont classées en trois catégories : *bon*, *mauvais* ou *incertain*, selon des critères prédéfinis imposés sur les résultats de l'analyse des performances de la puce. Les performances mesurées sont par exemple : les piédestaux, le bruit électronique par voie ; le profil du pulse ; la linéarité de la réponse en énergie, etc. Les critères appliqués sont stricts afin d'éviter d'assembler dans HGCAL des puces dont les performances ne seraient pas garanties. Les puces catégorisées comme mauvais ou incertain sont retestées une fois afin d'exclure qu'elles

aient été classifiées ainsi par erreur. Un QR-code imprimé sur les puces (Figure 11) permet une identification unique de celles-ci en direct par une caméra endoscopique montée sur la tête du robot. Les données brutes de performance collectées ainsi que le résultat des sélections pour chaque puce sont respectivement sauvegardés sur disque et dans une base de données locale au LLR. Les données brutes sont répliquées au Centre de Calcul de l'IN2P3, tandis que la base de données locale du LLR ira peupler une base de données de CMS/HGCAL au CERN.

La conception et la fabrication de la mécanique du robot, c'est-à-dire des supports pour les plateaux ("matrices") et pour les cartes de test, ainsi que la tête du robot (responsable de la prise / dépose des puces) et le montage précis de tous les composants du robot, a impliqué plusieurs personnes du service mécanique du LLR. Le service électronique du laboratoire a élaboré la carte pour les Arduinos, et a également apporté son soutien sur la compréhension des puces, le câblage du robot, etc. Enfin le groupe informatique, à travers ses ingénieurs *online* et réseau, a dirigé l'élaboration et la réalisation de la robotique, de l'automatique, et des aspects logiciel, réseau et base de données. Ce projet a donc impliqué les trois groupes techniques du laboratoire.

Grâce à l'assemblage de cinq lignes d'acquisition par robot, chaque robot est capable de tester et qualifier environ une puce HGCROC par minute. Chaque robot fonctionnera 24h/24, l'intervention d'un opérateur n'aura lieu que tous les 1 ou 2 jours afin de remplacer les plateaux – et de préparer l'envoi des puces qui ont passé le contrôle qualité vers le CERN. Les tests récents du robot ont montré la capacité de celui-ci à fonctionner dans le régime requis : le robot peut tester des puces en autonomie complète sur des durées longues, sans erreur. Des milliers d'HGCROC ont ainsi pu être testés. Maintenant que l'étape

de développement de la plateforme de tests touche à sa fin, la prochaine étape consiste à une finalisation de certains outils (interface graphique, communication entre bases de données, etc.), avant les tests en production à très grande échelle qui démarreront au deuxième semestre 2024. La plateforme a été développée afin d'être facilement ré-utilisée pour le test de puces destinées à d'autres expériences de physique.

Le LLR est aussi impliqué dans la caractérisation d'HGCROC3 pour la physique. Le LLR a développé certains des tests ainsi utilisés en ce sens, et a participé au test de dizaines de chips afin de vérifier leur performance, qui est satisfaisante.

Toutefois, certains problèmes ont été découverts dans l'ADC ("ADC plat") et dans les TDC ("TDC plats"), ainsi que dans la séquence de démarrage des TDC. Ces études ont été primordiales pour atteindre une meilleure compréhension d'HGCROC et ont permis de corriger ces faiblesses dans la dernière version de la puce (HGCROC3b).

Enfin, le LLR a contribué aux tests en irradiation d'HGCROC, à la fois en dose totale d'ionisation avec rayons-X ainsi qu'en faisceau de protons pour l'étude des effets d'événements singuliers. Le LLR a ainsi participé à la préparation de l'installation (à la fois électronique et logicielle), aux prises de données,

et a aussi été un acteur majeur à la vérification de ses performances en radiation. Le développement de ces outils et la conduite des prises de données et analyses sont venus renforcer les compétences des physiciens et ingénieurs du LLR, tout en augmentant considérablement leur visibilité dans l'expérience CMS, comme en démontre un prix prestigieux (CMS Achievement Award) décerné par la Collaboration à une étudiante en thèse du groupe.

Wagons

Le système électronique frontal du calorimètre HGAL de CMS est constitué d'un assemblage de divers circuits modulaires permettant d'acquérir les signaux issus des capteurs et de les transmettre vers l'acquisition centrale (**Figure 13**). Les "Wagons HD", une des pièces de cet assemblage de la partie centrale du calorimètre EM à capteur à Silicium, sont des circuits imprimés jouant le rôle d'intermédiaire entre les "modules HD" (constitués des capteurs à Silicium et des ASICs de lecture HGCROC) et les "HD engines" qui communiquent par liens optiques avec le système d'acquisition et l'électronique back-end.

Ainsi, ces wagons permettent de faire transiter vers les circuits de lecture HGCROC les informations de configuration, d'horloge et de déclenchement (issues des *HD engines*) et de concentrer et de transférer vers l'extérieur (via les *HD engines*) les informations de déclenchement et les données acquises et traitées par les ASICs *front-end*.

Au printemps 2023, le laboratoire a pris en charge le développement d'une variante de "Wagon HD", en collaboration avec le LPC Clermont pour le placement routage du circuit. Cette première variante, permettant de piloter 3 "modules HD" a nécessité une attention particulière en raison de fortes contraintes mécaniques (grande longueur de 50 cm, épaisseur limitée à 1.5 mm) et électroniques (forte densité de lignes série rapides). Le

système complet nécessite de concevoir neuf variantes de wagon HD, dont 3 au total seront prises en charge par le LLR.

Reconstruction

De longue date, il est dans la stratégie du groupe de s'investir dans les développements des algorithmes de reconstruction afin d'améliorer la sensibilité des analyses. Ainsi, bien avant le démarrage du LHC, Run 1, le groupe CMS du LLR avait pris la décision de se focaliser sur le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$; dans ce canal, le lepton de plus basse impulsion transverse a typiquement 10 GeV de p_T . Ce constat a été le point de démarrage de plusieurs années d'effort pour la mise en œuvre d'une reconstruction des électrons précise et très efficace jusqu'à environ 7 GeV de p_T qui, depuis lors, est l'algorithme utilisé dans toutes les analyses de CMS.

Au cours du Run 1, le groupe a été fortement impliqué dans la mise au point de l'algorithme de "flux de particules" (PF) qui, permettant des améliorations significatives dans la reconstruction des jets, de l'énergie transverse manquante, la reconstruction des électrons non isolés, s'est imposé comme l'algorithme par défaut dans CMS. Il convient de noter qu'au moment de sa conception, il était généralement admis que le PF ne servirait que dans la phase de basse luminosité du LHC. Cependant, la quantité d'événements d'empilement augmentant, il est rapidement devenu évident que le PF était, en réalité, la seule approche efficace pour contrer les effets de l'empilement. Cela provient du fait que le PF en reconstruisant les particules individuellement fournit les ingrédients les plus adaptés aux algorithmes visant à séparer le signal du bruit de fond d'empilement. Ainsi, le design de HGAL est en pleine cohérence avec la reconstruction PF. C'est donc naturellement que la forte implication du groupe dans la construction d'HGCAL se traduit également dans une participation à la mise au point

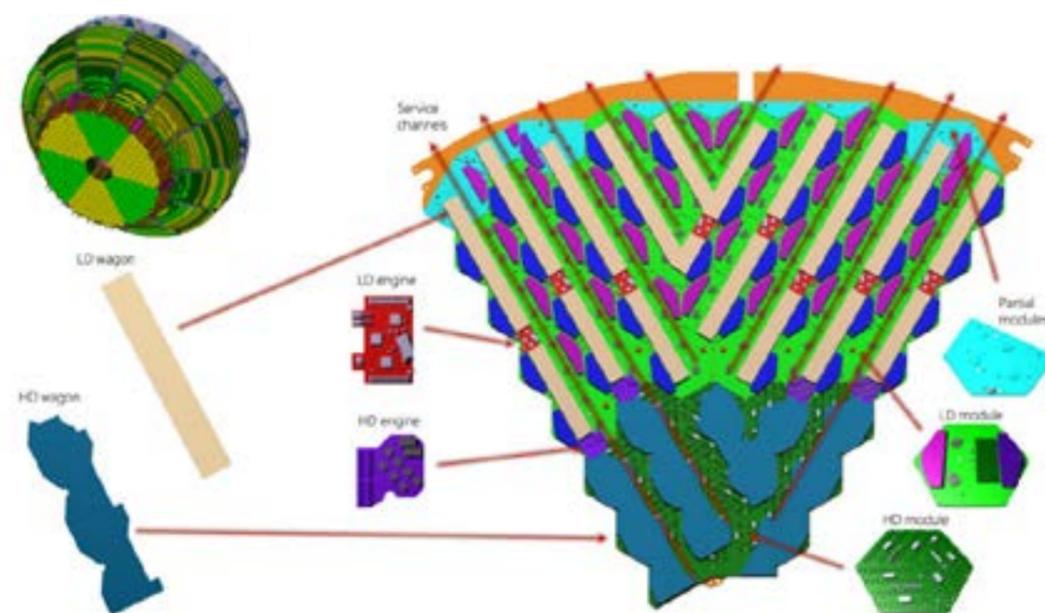


Figure 13 : Illustration d'un secteur du calorimètre CEE de HGAL et de ses différents constituants électroniques.

et a mené la plupart des analyses de données. Les bonnes performances et la bonne tenue de la puce HGCROC aux radiations ont pu ainsi être confirmées. Toutefois, deux faiblesses ont pu être identifiées : une augmentation anormale du courant dans un nœud lors du test en dose totale d'ionisation ; et un problème avec la boucle verrouillée en phase qui conduit à des événements transitoires singuliers – à décalage permanent dans la transmission de données de la puce vers l'extérieur – lors du test en faisceau

de protons. Les sections efficaces de ces phénomènes, ainsi que d'autres types d'événements singuliers, ont été mesurés.

Pour conclure, le LLR est impliqué dans plusieurs aspects du développement et du contrôle des performances de la puce de lecture HGCROC d'HGCAL. Le laboratoire est responsable de la mise en œuvre de deux plateformes de tests automatisés pour le test en qualité en puces après production. Le LLR a aussi contribué à la caractérisation des puces HGCROC avant leur production,

des algorithmes de reconstruction. La reconstruction individuelle des particules dans l'environnement du HL-LHC comporte de nombreux défis. En effet, le calorimètre compte 6 millions de cellules et du fait de la quantité d'évènements empilés, le nombre de cellules qu'un algorithme d'agrégation doit traiter est de l'ordre de 10^5 ce qui impose de

penser dès la conception l'optimisation algorithmique pour que le temps CPU dédié à cette tâche soit compatible avec les contraintes du HLT comme de la reconstruction hors-ligne. De plus, la géométrie du détecteur n'est pas triviale avec des cellules hexagonales qui existent en deux tailles différentes en fonction de la proximité à l'axe du faisceau.

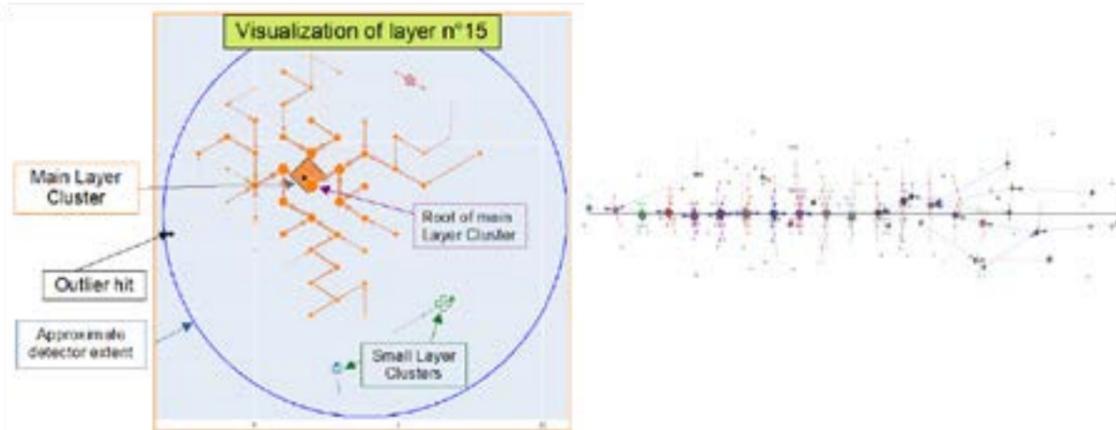


Figure : 14 Reconstruction d'un agrégat à 2D (à gauche) et à 3D (à droite) dans HGAL.

La stratégie du groupe consiste à exploiter l'expertise qui y est présente en matière de reconstruction d'électrons et d'algorithmes PF. Il est pertinent de procéder dans cet ordre. En effet, les électrons sont les objets les plus simples pour lesquels une combinaison trace-agrégat calorimétrique est nécessaire et représente ainsi le premier stade de l'approche PF, à une nuance importante près : les dépôts d'énergie des électrons, du fait de l'émission de Bremsstrahlung lors de la traversée du trajectographe, sont étalés dans le calorimètre avec une topologie spécifique. La recollection des agrégats provenant de l'électron et des photons de Bremsstrahlung est appelée "superclustering". Il faut aussi souligner que le groupe était en pointe sur la reconstruction et l'identification des électrons au sein du *Technical Proposal*

HGCAL et dans le *Technical Design Report*. Plusieurs approches pour les algorithmes d'agrégation ont été testées, notamment dans les deux ouvrages cités ci-dessus, et le groupe a été en première ligne pour tester les performances et proposer des améliorations depuis. Deux grandes options se sont dégagées au fur et à mesure. La première est qu'une agrégation en deux étapes, 2D au sein de chaque couche puis en 3D à la traversée du détecteur est la plus efficace (Figure 14). On réduit ainsi rapidement la combinatoire. La deuxième est qu'il est indispensable d'adapter l'algorithme au type de particules recherchées (électromagnétique vs hadrons) et qu'il ne faut pas s'interdire une approche itérative. D'ailleurs l'environnement logiciel pour effectuer ces tâches se nomme TICL (*The Iterative Clustering*

framework). Les objets reconstruits sont dénommés *tracksters*.

Le travail au sein du groupe s'est focalisé sur la reconstruction des agrégats électromagnétiques avec et sans empilement. En premier lieu, des critères de qualité ont été dégagés ; puis on s'est attelé à la reconstruction de la direction de la gerbe. Cela constitue une nouveauté dans CMS, puisque le précédent calorimètre électromagnétique était monocouche. Lors du calcul de la direction via une analyse en composantes principales (PCA) des variables de qualité sont simultanément extraites. La direction reconstruite se révèle dépendre peu de la pollution à la périphérie des *tracksters* due à l'empilement, ce qui fait qu'elle est ensuite exploitée pour nettoyer les *tracksters* des "impuretés" issues des évènements d'empilement. Ces dernières ont, en effet, une faible probabilité de se trouver selon l'axe de la gerbe et peuvent être dissociées des *tracksters*. La direction de la gerbe peut ensuite être recalculée après nettoyage, et elle se trouve correspondre encore mieux à celle de la particule incidente. Ces avancées ont été incorporées dans la version TICLv5 de l'environnement officiel de reconstruction.

Avant de procéder à l'étape de superclustering, il faut construire une liste des *tracksters* électromagnétiques de bonne qualité et les distinguer des *tracksters* issus de hadrons ayant développé une gerbe de façon précoce au sein du calorimètre électromagnétique. Les Graph Neural Networks (GNN) se trouvent être un outil parfaitement adapté à cette problématique en permettant de s'affranchir de la topologie non triviale du détecteur. Il s'agissait de la première utilisation d'un GNN dans le cadre de la reconstruction de CMS. On dispose finalement d'une liste de *tracksters* électromagnétiques de bonnes qualités, débarrassés de la contribution de l'empilement et dont la direction est reconstruite précisément.

Lors de la traversée de la matière du trajectographe par des électrons, des photons de Bremsstrahlung sont émis, conduisant à une diminution de l'énergie de l'électron entraînant une diminution du rayon de courbure de la trajectoire de ce dernier. Cela conduit à une répartition géographique très spécifique (Figure 15 gauche). Au Run 1, les dépôts localisés dans une étroite bande en η constituaient un supercluster (Figure 15 centre). Aux Run 2&3, des formes paramétrées en forme de moustache ont permis de limiter la pollution due à l'empilement en restreignant la zone de collecte (Figure 15 droite).

Avec HGCAL qui donne accès à la direction des gerbes, de nouvelles perspectives se sont ouvertes. Une approche utilisant des réseaux de neurones profonds (DNN) a donc été adoptée au sein de l'équipe du LLR. La version de base réutilise les mêmes observables que l'algorithme utilisé aux Runs 2 et 3 : essentiellement les positions des dépôts d'énergie relativement au plus énergétique. Afin de jauger de l'apport de l'information de direction, un deuxième entraînement a été réalisé en ajoutant les directions des *tracksters*. Le DNN se révèle apporter un gain significatif par rapport à l'algorithme en vigueur au Runs 2 et 3 avec une amélioration de la résolution atteignant 20 % dans la région la plus difficile, à bas p_T et proche du faisceau. L'utilisation de la direction des *tracksters* permet de diminuer de 20 % la contamination du supercluster par des dépôts d'énergie provenant des évènements empilés pour une efficacité identique, voire légèrement supérieure. Ce superclustering à base de DNN est destiné à devenir le défaut dans TICLv5, et il a donc été ré-écrit en C++ tout en saisissant cette opportunité pour simplifier le déroulement de la reconstruction.

Tous ces développements algorithmiques ont été conduits à l'aide d'évènements simulés et on pouvait légitimement s'interroger sur le comportement de

ces algorithmes dans les données. C'est pourquoi a émergé l'idée en 2022 au sein de l'équipe d'utiliser les données du faisceau test de 2018, qui avait permis d'enregistrer des événements d'un vrai prototype multicouche du détecteur, pour vérifier le comportement de l'algorithme d'agrégation.

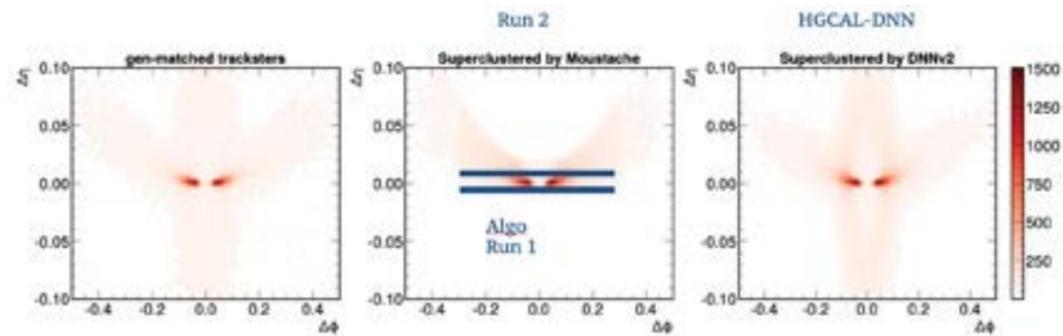


Figure 15 : Agrégation de l'énergie des agrégats autour du plus énergétique : évolution de l'algorithme (Run 1, Run 2, HGAL).

Production de paires HH dans la voie en deux quarks b et deux leptons tau

CMS Collaboration, Search for nonresonant Higgs boson pair production in final state with two bottom quarks and two tau leptons in proton-proton collisions at (\sqrt{s}) 13 TeV, Physics Letters B 842 (2023) 137531.

Le canal de désintégration $bb\tau\tau$ offre un bon compromis entre un rapport d'embranchement important (7,3 %) et la pureté de la sélection τ , assurant un bon rejet de la contamination des bruits de fond. C'est donc le canal qui a été choisi dès 2015 par le groupe avec, en cohérence avec l'expertise du secteur du Higgs développée au sein du groupe, une priorité mise sur l'analyse non-résonante. Dans ce canal, les principaux bruits de fond de l'analyse sont les événements Drell-Yan accompagnés de jets, la production de paires de quarks top, ainsi que les événements QCD multijets.

Un grand nombre des éléments constitutifs de la première analyse pilotée par le groupe CMS du LLR et effectuée sur les données 2016 [1] structure encore l'analyse publiée et celle en cours au Run 3. La première étape importante dans la mise au point de cette analyse est liée aux leptons τ et consiste en l'évaluation du bruit de fond causé par les jets identifiés à tort comme des τ . La méthode "ABCD" utilisant des régions de contrôle exploitant des événements où deux τ de même charge sont reconstruits, avec des critères d'identification relâchés afin de déterminer la contamination des événements QCD multijets dans la région du signal est utilisée. Le groupe a considérablement optimisé cette méthode pour minimiser les incertitudes sur la forme des distributions et des constantes de normalisation. L'équipe du LLR, qui a contribué dès le début du Run 2 à cette analyse, était particulièrement en pointe sur l'optimisation de la procédure de sélection, le contrôle de la qualité des objets, et a pu valoriser l'expertise locale sur les critères de déclenchement. Ainsi l'ajout d'un critère de déclenchement VBF au niveau 1 à partir de 2017, a permis de bénéficier de quelques kHz de bande passante obtenus de haute lutte. La création de catégories VBF correspondantes permet la détermination du couplage quartique

c_{2V} Une autre amélioration portée par le groupe est la détermination à partir des données du bruit de fond de production de paires de quarks top.

Du fait des bruits de fond et de la complexité de l'état final, l'analyse HH est, sans surprise, un cadre privilégié pour le déploiement de techniques multivariées à base de réseaux de neurones. Ainsi, entre l'analyse 2016 et l'analyse finale du Run 2, on peut citer les améliorations suivantes :

- Utilisation d'un réseau de convolution de neurones (CNN) pour l'identification des τ (DeepTau)
- Déploiement de réseaux de neurones récurrents (RNN) pour l'identification des jets de b
- Développement d'un RNN pour la sélection des paires de jets de b spécifiquement dans le contexte HH
- Mise en œuvre d'une approche multi-classes à base de réseaux de neurones profonds (DNN)
- Utilisation d'un DNN comme estimateur final pour l'extraction du signal

L'équipe du LLR a participé à divers degrés à toutes ces améliorations au sein du groupe de travail, car chacune doit être intégrée au programme d'analyse et surtout méticuleusement validée via des comparaisons données-simulation dans des régions de contrôle bien choisies. En fin de chaîne, l'interprétation des résultats dans le cadre des théories de champ effectives a été portée par le groupe.

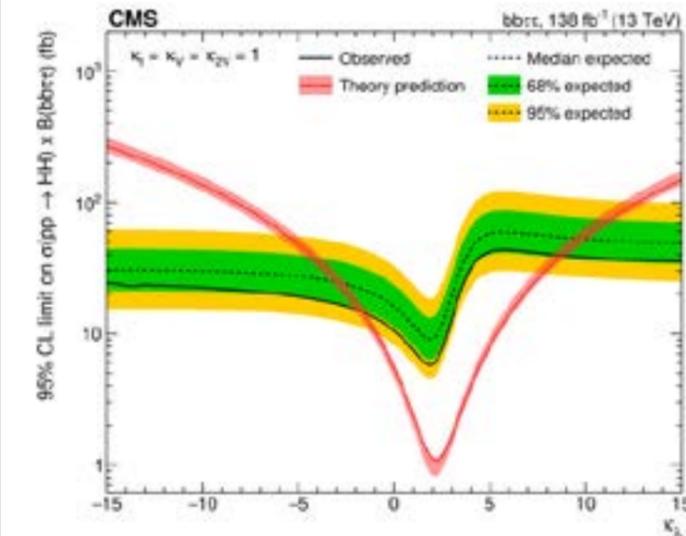


Figure 16 : Limites attendue et observée sur la constante d'autocouplage du boson de Higgs.

Au final, à 95 % de niveau de confiance, la constante d'autocouplage est contrainte à l'intervalle $[-1.7 ; 8.7]$ fois la valeur prévue dans le modèle standard (Figure 16). Du fait de la très faible section efficace de production, la limite mesurée sur la production VBF est au niveau de 124 fois l'attendu du Modèle Standard. Parmi les analyses HH, il s'agit du plus sensible. En outre, les canaux VBF permettent de contraindre le couplage quartique c_{2V} dans l'intervalle $[-0.4 ; 2.6]$. La limite attendue obtenue est 5.2σ SM (et 3.3 mesuré). Avec la même luminosité intégrée, l'analyse 2016 aurait conduit à une limite de 12.8σ SM ; ainsi les diverses améliorations apportées à l'analyse ont permis d'améliorer sa sensibilité d'un facteur 5. Cette amélioration spectaculaire explique que ce canal soit sous les projecteurs pour l'actuel Run 3 du LHC et s'annonce comme une analyse majeure au HL-LHC.

Diffusion des bosons de jauge massifs

CMS Collaboration, Evidence for electroweak production of four charges leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, Phys. Lett. B 812 (2021) 135992.

La diffusion des bosons de jauge faibles est particulièrement intéressante pour étudier la brisure spontanée de la symétrie électrofaible et le mécanisme BEH qui permet aux bosons W et Z d'acquérir une masse dans la théorie décrivant les particules élémentaires et leurs interactions (modèle standard ou SM). L'existence d'une masse est directement liée à la présence d'un état de polarisation supplémentaire, la polarisation longitudinale. La section efficace de diffusion des bosons W et Z ayant une polarisation longitudinale diverge à haute énergie et viole l'unitarité en l'absence de couplage quartique entre bosons et en l'absence des contributions impliquant le boson de Higgs. Ces processus permettent de tester des modèles au-delà du SM, qui pourraient modifier le secteur scalaire avec des bosons de Higgs supplémentaires ou un boson de Higgs composite.

Au LHC, la diffusion des bosons de jauge procède par l'émission de bosons W ou Z par les quarks issus des protons. Elle se caractérise par la présence dans l'état final de deux jets à l'avant et de grande énergie alors que les produits de désintégrations des W ou Z sont émis dans la région centrale en rapidité. Il s'agit d'un processus impliquant uniquement des interactions électrofaibles. Les sections efficaces sont de l'ordre du fb d'O(fb). Il s'agit des processus les plus rares observés au LHC. La collaboration CMS a observé avec les données de 2016 la diffusion des bosons de jauge dans le canal $pp \rightarrow W^+W^+qq \rightarrow l^+l^+uq$ où les deux bosons W sont de même signe et sont détectés via leurs désintégrations leptoniques. De nouveaux résultats ont été obtenus avec l'ensemble des données du Run 2, permettant également d'observer ce processus rare dans le canal $pp \rightarrow W^+Zqq \rightarrow l^+l^+lqq$.

L'équipe du LLR participe activement à ces recherches en utilisant le canal $pp \rightarrow ZZqq \rightarrow l^+l^+lqq$. Ce canal bénéficie de la reconstruction complète des particules de l'état final, et malgré un taux d'évènements très faible, est ultimement celui qui permet la meilleure identification de l'état de polarisation longitudinale par la mesure des distributions angulaires des leptons de l'état final. Après une première étude avec les données de l'année 2016, nous avons analysé l'ensemble des données 2016–2018 du Run 2 pour mesurer ce processus [1]. Le résultat est montré à la

Figure 17.

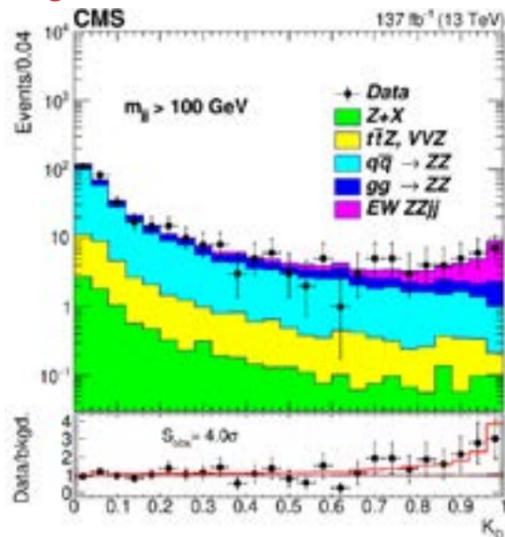


Figure 17 : Distribution du discriminant cinématique tel qu'utilisé pour l'extraction du signal dans la mesure du processus de diffusion de bosons vecteur (Vector Boson Scattering – VBS) $ZZ \rightarrow 4l$)

Le signal est observé avec une signification statistique de 4,0 déviations standards (3,5 déviations standards attendues par le SM). La figure montre la distribution du discriminant utilisé pour la séparation du signal et des bruits de fonds. Le discriminant est construit à partir des éléments de matrice et prend en compte l'ensemble des caractéristiques cinématiques du signal et du bruit de fond principal constitué par la production $pp \rightarrow ZZqq$ où les 2 jets sont produits via l'interaction forte. La section efficace fiducielle pour le processus $pp \rightarrow ZZqq \rightarrow l^+l^+lqq$ est mesurée à : $S_{fid} = 0.33^{+0.10}_{-0.08}$ (stat) $^{+0.04}_{-0.03}$ fb. Des limites sont également mises sur l'existence de couplages anormaux prédits dans des théories au-delà du SM. La contribution de l'équipe du LLR a porté en particulier sur la mesure des bruits de fond, l'analyse statistique et la modélisation et l'extraction des limites sur les couplages anormaux.

L'équipe du LLR est également impliquée dans les mesures de diffusion de boson de jauge dans le canal semi-leptonique ZV, où le boson Z se désintègre de façon leptonique et où V désigne un boson W ou Z dont on recherche la signature par sa désintégration en 2 jets. Elle prépare aussi les futures mesures de polarisation dans la diffusion des bosons de jauge par une étude de la polarisation dans la production di-boson $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$.

Portrait du boson de Higgs – 10 ans après la découverte

CMS Collaboration, A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery, Nature 607 (2022) 7917, 60-68 & Ibid. 623 (2023) 7985 (erratum).

Le mécanisme de Higgs, ou mécanisme BEH a été proposé en 1964 pour résoudre un problème fondamental de la théorie décrivant les particules élémentaires et leurs interactions, le modèle standard (SM). Dans cette théorie, les bosons de jauge médiateurs des interactions faibles sont naturellement de masse nulle comme le photon qui véhicule l'interaction électromagnétique. Or les bosons faibles W et Z, découverts au CERN en 1983, sont massifs. Le mécanisme proposé de brisure spontanée de la symétrie introduit un nouveau champ scalaire, le champ de Higgs, qui fournit des termes de masse par interaction avec les champs des bosons de jauge. Le même champ scalaire permet également d'introduire des termes de masse pour les fermions. La présence du champ de Higgs implique l'existence d'un nouveau boson, le boson de Higgs (H), recherché vainement dans les précédents collisionneurs au CERN (le LEP) et au Fermilab (le Tevatron). Le boson H a finalement été découvert en juillet 2012 au LHC et l'équipe du LLR a joué dans cette découverte un rôle majeur via le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$.

La section efficace de production du H au LHC est faible, $54 \pm 2,6$ pb à $\sqrt{s} = 13$ TeV. La difficulté essentielle pour l'observation vient des bruits de fond. Le mode de désintégration dominant $H \rightarrow bb$ est noyé par le bruit de fond multijet au LHC. Il faut chercher des modes de désintégrations plus favorables, comme $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ ou $H \rightarrow \gamma\gamma$, ou bien des modes de production sous-dominants comme la production associée par Higgsstrahlung, $pp \rightarrow VH$, $H \rightarrow bb$, ($V = W, Z$) avec V se désintégrant en leptons, plus favorables à la détection. Les évènements sont catégorisés en fonction de signatures correspondant aux différents modes de production et de désintégration du H. La production procède principalement par fusion de gluons, à travers une boucle virtuelle faisant intervenir principalement le couplage du H

au quark top. La production associée avec 2 quarks top, $pp \rightarrow \tau\tau H$, fait également intervenir le couplage du H au quark top. Les productions par fusion de bosons vecteurs $pp \rightarrow qqH$ et par Higgsstrahlung $pp \rightarrow VH$ font intervenir les couplages du H aux bosons vecteurs W et Z. Les résultats des mesures de couplages du boson H sont obtenus par la combinaison des canaux $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$, $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l2\nu$, $H \rightarrow Z\gamma \rightarrow 2l\gamma$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow bb$ et $H \rightarrow \mu\mu$. L'équipe du laboratoire a joué un rôle majeur dans l'analyse $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ ainsi que dans la combinaison des résultats de CMS. En juillet 2012, la combinaison donnait une signifiante statistique observée de 5.0 écarts standards (σ) pour 5.8σ attendus par le SM, avec $H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ comme canaux les plus sensibles sont avec une mesure à 4.1σ et 3.2σ , resp. (et une signifiante attendue de 2.8 et 3.8σ resp.). Avec les données du Run 1, le seuil conventionnel d'observation (5σ) dans les canaux individuels $H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ a été dépassé tandis qu'une signifiante de 4.7σ est obtenue pour le canal $H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l2\nu$. Avec les données du Run 2, le canal $H \rightarrow \tau\tau$ a été observé à 5.9σ (6.6σ attendu), $H \rightarrow bb$ à 5.6σ et $t\bar{t}H$ à 5.2σ . Finalement, une évidence à 3σ a été obtenue pour le mode $H \rightarrow \mu\mu$.

Une physique au-delà du SM affecte la production et la désintégration de façon consistante entre les différents modes d'observation. Par exemple, une modification des interactions entre le boson H et le boson Z touche non seulement la production $H \rightarrow ZZ^*$ mais aussi ZH et la fusion de bosons vecteurs $pp \rightarrow qqH$. Un premier ajustement simplifié introduit deux types de modifications, k_f et k_V , où les k désignent des modificateurs des couplages intervenant à la production et à la désintégration. Un second ajustement est effectué pour extraire les modificateurs pour les bosons de jauge massifs (k_W et k_Z) et les fermions (k_e , k_ν , k_t et k_b). Les prédictions pour les processus qui impliquent des boucles, par exemple pour la production par fusion de gluon ou la désintégration en paires de photons, sont calculées à partir des modificateurs de couplages k décrit ci-dessus. Le résultat (Figure 18) montre un accord remarquable sur 3 ordres de grandeur pour la masse. La dépendance linéaire constitue une remarquable confirmation du mécanisme BEH et qui conduit à des bosons de jauge et aux fermions massifs. Les incertitudes sont $\sim 2-3\%$ pour les couplages aux bosons de jauge, au quark top et au tau, $\sim 15-20\%$ pour les couplages au quark b et aux muons.

La publication inclut également les résultats des mesures de production de paires de bosons de Higgs $pp \rightarrow HH$, qui permettent de contraindre l'auto-couplage trilineaire du boson de Higgs.

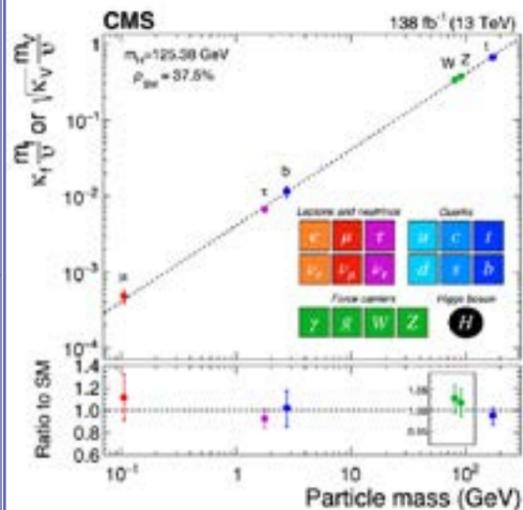


Figure 18 : Couplages mesurés du boson de Higgs aux fermions et aux bosons de jauge faible en fonction de la masse du fermion ou du boson de jauge. Pour les bosons de jauge la racine carrée du couplage est utilisée en ordonnée afin de montrer la dépendance linéaire attendue pour le mécanisme BEH de brisure de symétrie électrofaible adopté par le modèle standard.

Sections efficaces inclusives et différentielles

CMS Collaboration, Measurements of inclusive and differential cross sections for the Higgs boson production and decay to four-leptons in proton-proton collisions at 13 TeV, Journal of High Energy Physics 08 (2023) 040.

L'analyse complète du boson de Higgs et la mise en évidence éventuelle de signes de nouvelle physique (NP) passent par une série de mesures incluant la masse, la largeur, les nombres quantiques ou les couplages aux champs fondamentaux. La production du boson de Higgs est souvent caractérisée via le schéma dit de "Simplified Template Cross-Section" (STXS), qui définit des régions d'espace de phase mutuellement exclusives pour maximiser la sensibilité aux effets de NP et de réduire, en même temps, la dépendance aux modèles théoriques. Les mesures de sections efficaces fiducielles constituent une approche complémentaire pour la production mais aussi pour la désintégration du boson de Higgs. Elles fournissent en effet un lot de résultats moins dépendant du modèle théorique en annulant les effets de détecteur via une procédure d'unfolding, permettant ainsi une comparaison directe avec les prédictions théoriques les plus récentes. Toutes les mesures sont ainsi effectuées dans un espace de phase fiduciel défini pour reproduire l'acceptance et les critères de la sélection expérimentale.

Cette analyse présente non seulement une mesure de la section efficace inclusive dans le canal $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ (où l =électron ou muon) mais aussi des mesures différentielles (Figure 19). Celles-ci incluent de très nombreuses distributions cinématiques sensibles à la production et à la désintégration du boson de Higgs (masse invariante des Z's, angles décrivant la cinématique de désintégration des Z's, nombre et impulsions des jets, masse invariante des jets de plus grande impulsion, impulsion transverse et rapidité du boson de Higgs reconstruit, etc...). Les résultats incluent également six mesures doublement différentielles ainsi que, pour la première fois au LHC, les discriminants cinématiques sensibles aux couplages anormaux et construits à l'aide de la méthode des éléments de matrice.

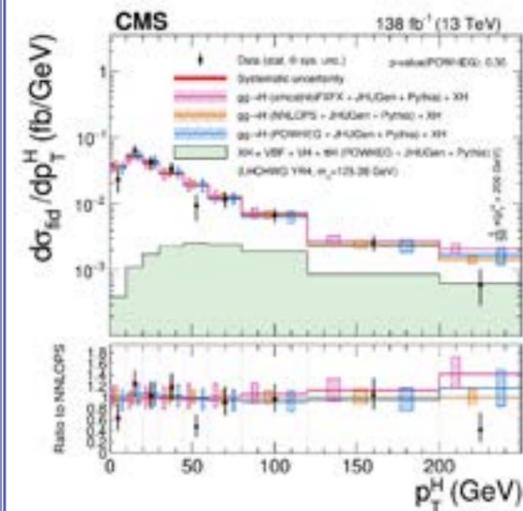


Figure 19 : Section efficace différentielle en fonction de l'impulsion transverse du boson de Higgs reconstruit. La mesure est comparée à diverses prédictions théoriques (en rose, orange et bleu).

La section efficace fiducielle inclusive est mesurée à 2.73 ± 0.22 (stat) ± 0.15 (syst) fb, en bon accord avec les prédictions théoriques. Les mesures différentielles sont comparées aux générateurs aMC@NLO, NNLOPS et POWHEG, tous interfacés avec JHUGen pour la partie désintégration, et ne présentent pas de désaccords significatifs. La section efficace différentielle de l'impulsion transverse du boson de Higgs (p_T^H)

reconstruit (voir **Figure 19**) est exploitée pour poser une contrainte sur l'auto-couplage du boson de Higgs (et plus précisément sur $\kappa_\lambda = \lambda/\lambda_{SM}$). L'intervalle exclu, à 95 % de niveau de confiance, est : $-5.4 < \kappa_\lambda < 14.9$. Cette mesure est complémentaire et compétitive avec les autres contraintes obtenues sur κ_λ via d'autres moyens. La section efficace différentielle de p_T^H pour la production du Higgs via la fusion de gluons est aussi utilisée pour poser des contraintes sur les couplages du boson de Higgs aux quarks b et c .

L'équipe du LLR a joué un rôle majeur dans ce papier, d'abord car celui-ci s'appuie sur l'ensemble des développements (sélection, estimation des bruits de fond et des incertitudes systématiques) de l'analyse standard $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ [1]. Elle a en outre défini l'ensemble des variables mesurées, développé le modèle d'unfolding et le cadre statistique pour l'extraction et l'interprétation des résultats. Enfin, une méthode originale développée au LLR a permis de diminuer d'environ 40 % l'incertitude systématique dominante liée aux différences entre données et simulation des efficacités de reconstruction et de sélection des électrons.

[1] CMS Collaboration, *Measurements of production cross sections of the Higgs boson in the four-lepton final state in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 488.

L'accord données-simulation s'est révélé très bon, ce qui démontre au passage les excellentes performances de la simulation Geant4 utilisée. Cette étude a été menée efficacement au cours d'un stage, car le groupe avait déjà une expérience des données de faisceau test. Il avait été un acteur majeur de l'article étudiant les performances de la reconstruction (notamment résolution en énergie) dans le CE-E. Il avait aussi contribué aux études de la résolution temporelle. Dans les années à venir, les activités du groupe dans le domaine de la reconstruction seront axées en premier lieu sur la finalisation de la chaîne de reconstruction des électrons. D'autre part, les ingrédients pour attaquer la conception d'un algorithme PF sont en place et compte tenu de l'importance des leptons tau dans le programme de physique de groupe, la conception de leur reconstruction au sein d'HGCAL constituera un deuxième axe majeur de travail

3.1.5 Prospective pour un futur collisionneur de haute intensité et haute énergie

Revue des contributions et résultats scientifiques

La nécessité d'explorer à très hautes statistiques le nouveau secteur de Higgs, depuis les couplages du boson scalaire aux bosons vecteurs de l'interaction faible jusqu'au couplage de Yukawa au quark top, fait l'objet d'un vaste consensus international en physique des hautes énergies. À long terme, vraisemblablement auprès d'un nouveau collisionneur hadronique, il s'agit d'accéder à l'autocouplage du boson de Higgs et à la forme du potentiel associé au champ scalaire. À court terme, un vaste programme de recherche pourra être effectué auprès d'un collisionneur e^+e^- .

Le LLR est impliqué dans la R&D pour les détecteurs auprès des futurs collisionneurs e^+e^- (ILC, CLIC, FCC-ee ou CEPC). L'une des approches les plus novatrices pour améliorer les performances de ces détecteurs consiste à reconstruire l'ensemble du flux de

Les effectifs

Le **groupe R&D SiW-ECAL** pour la prospective de physique et le développement d'un nouveau calorimètre-imageur ultra-granulaire en vue d'un futur collisionneur e^+e^- est piloté par Vincent Boudry. En plus du support des groupes techniques du LLR, il peut s'appuyer sur les contributions de deux physiciens émérites toujours actifs :

- **Permanents** : Vincent **Boudry** et Jean-Claude Brient⁽¹⁾, Henri Videau⁽²⁾.

⁽¹⁾<2022 ⁽²⁾<2011

Le projet prévoit l'arrivée en 2024 de deux post-doctorats sur deux projets ANR dont un projet franco – allemand.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Fabricio Morales Jimenez⁽²⁾ et Jonas Kunath⁽¹⁾.

⁽¹⁾Ph.D. ⁽²⁾post-doc

À ceux-ci s'est ajouté l'apport intermittent de cooègue de CMS dont le physicien de CMS (Roberto Salerno) pour la prospective auprès du futur collisionneur FCC et le post-doctorant (Louis Portales) partagé avec CMS pour des études de calorimétrie.

particules, en combinant au mieux l'information des trajectographes et des calorimètres. Avec les techniques actuelles, les mesures de traces sont bien meilleures que les mesures calorimétriques jusqu'à de très hautes impulsions. Pour les impulsions caractéristiques atteintes dans les événements multibosons qui dominent la physique attendue pour ces machines, les calorimètres ne sont utiles que pour mesurer des photons et des hadrons neutres représentant respectivement en moyenne 25 % et 10 % de l'énergie des jets. L'approche dite du *Particle Flow* n'est toutefois possible qu'à la condition de pouvoir distinguer les contributions individuelles de ces particules dans les jets. Ceci nécessite des calorimètres compacts (c'est-à-dire qui génèrent des gerbes compactes), dotés d'une granularité centimétrique ainsi que des algorithmes de reconstruction performants.

La R&D effectuée au sein des collaborations ILD (International Large Detector) et CALICE (Calorimétrie par Imagerie) est complémentaire. ILD vise à fournir un design réaliste et complet d'une expérience basée sur ces principes,

et à partir de simulations détaillées d'évaluer les performances, en testant différents algorithmes. CALICE a pour but de construire et de tester des prototypes de calorimètres satisfaisants à l'ensemble des critères techniques, en particulier de l'intégration de l'électronique de lecture au cœur des détecteurs. Le LLR a été un élément fondateur des deux collaborations, de différents algorithmes (ARBOR, GARLIC), et de la réalisation d'un prototype de calorimètre électromagnétique Silicium-Tungstène (SiW-ECAL). Les concepts explorés dans ILD/CALICE ont été repris et développés pour la jouvence des calorimètres bouchons de CMS, le HGCAL.

Le SiW-ECAL associe des capteurs à base de diodes silicium PIN très stables, permettant une granularité extrême (ici 5×5 mm²), à des absorbeurs en tungstène qui garantissent des gerbes compactes, et une bonne stabilité mécanique, sans zone morte, fournie par des structures alvéolaires en fibre de carbone. Le design du SiW-ECAL d'ILD est modulaire, une nécessité pour la production d'un détecteur de 100 000 éléments de détection, pour un total de 10 millions de canaux. La conception et validation

des éléments de détection est la partie technique la plus ardue. Un élément de 1024 voies est constitué de 4 galettes de silicium collées sur un PCB qui porte 16 ASICs assurant l'auto-déclenchement, la lecture, le stockage et la numérisation de chaque voie. Chaînés les uns aux autres pour former des cassettes contenant jusqu'à 12 éléments, ils doivent aussi assurer une alimentation et une transmission de signaux optimale sans détériorer le rapport signal sur bruit.

Le HGCAL de CMS a permis la réalisation du potentiel de l'ajout d'une dimension temporelle à la calorimétrie ultra-granulaire, avec une granularité typique de $1\text{cm}/c \sim 30\text{ps}$. L'exploitation du temps dans les algorithmes de Particle Flow pourrait permettre à la fois une simplification et plus de robustesse. Deux financements ANR (Calo5D et T-Calo) ont été obtenus pour 2024 pour intégrer cette dimension dans les simulations, les algorithmes et évaluer les gains de performance en termes de physique pour les futurs détecteurs.

3.1.6 Calorimètre imageur ultra-granulaire pour un nouveau collisionneur e^+e^-

L'une des approches les plus novatrices pour améliorer les performances des détecteurs pour les futurs collisionneurs e^+e^- (ILC, CLIC, FCC-ee, CEPC), consiste à reconstruire l'ensemble du flux de particules (*Particle Flow*), en

combinant au mieux l'information des trajectographes et des calorimètres. Avec les techniques actuelles, les mesures de traces sont bien meilleures que les mesures calorimétriques jusqu'à de très hautes impulsions, concrètement jamais atteintes dans les événements multibosons qui dominent la physique prévue pour ces machines. Dès lors, les calorimètres ne sont utiles que pour la mesure des photons et des hadrons neutres, représentant respectivement en moyenne 25 % et 10 % de l'énergie des jets (avec de larges fluctuations). L'approche dite du *Particle Flow*, qui combine les mesures des chargés exclusivement par leur trace, et les neutres par le dépôt calorimétrique, n'est toutefois possible qu'à la condition de pouvoir distinguer les contributions individuelles de ces particules dans les calorimètres. Ceci nécessite des détecteurs compacts (c.-à-d. qui génèrent des gerbes compactes), dotés de "voxel" centimétriques pour imager les gerbes en 3 dimensions, et des algorithmes de reconstruction performants.

Les études et la R&D sont effectuées au sein de deux collaborations complémentaires : ILD et CALICE. ILD est un concept de détecteur (Figures 20 et 21) optimisé pour le Particle Flow ; il vise à fournir un design réaliste et complet d'une expérience établie sur ces principes, et à partir de simulations détaillées, d'en évaluer les performances,

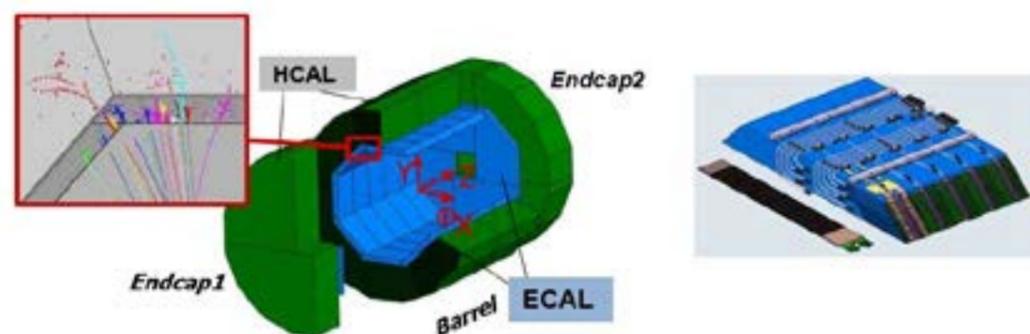


Figure 20 : (Au centre) Maquette de la partie calorimétrique d'ILD, pour l'une des deux géométries du HCAL. (Encart) une partie d'un jet tel que vu par un algorithme de Particle Flow. (À droite) maquette d'un des 40 modules du SiW-ECAL du Barrel d'ILD, et une des cassettes de détection. L'espace prévu entre le ECAL et le HCAL n'est que de 3 cm.

en testant différents algorithmes. La collaboration CALICE vise à construire et tester des prototypes de calorimètres satisfaisants l'ensemble des critères techniques, particulièrement de l'intégration de l'électronique de lecture au cœur des détecteurs.

Un modèle complet d'ILD a été produit pour une lettre d'intention (2010), puis pour le TDR de l'ILC (2013). Ce modèle convient à des collisions avec une énergie du centre de masse de 500 à 1000 GeV. En 2020, il a été affiné pour les collisions à 250 GeV, au pic de la production du "Higgsstrahlung" ZH, en explorant des options moins onéreuses, et publié sous la forme d'Interim Design Report.

Le SiW-ECAL en est l'un des sous-détecteurs avec la description la plus aboutie : une note technique exhaustive (plus de 110 pages) le décrit en détail (2018). ILD et le SiW-ECAL ont été pris comme référence pour les concepts de CLICdp, du baseline de CEPC, de CLD (pour le FCCee). Le SiW-ECAL associe des matrices de diodes silicium PIN, très stables et permettant une granularité extrême (ici $5 \times 5 \text{ mm}^2$), à des absorbeurs en tungstène qui garantit des gerbes compactes, et une bonne stabilité mécanique, avec des zones mortes minimales grâce à l'usage de structures alvéolaires en fibre de carbone. Le design du SiW-ECAL d'ILD est modulaire, une nécessité pour la production d'un détecteur de $\sim 100\,000$ éléments de

détection, pour un total de ~ 100 millions de canaux.

La conception et validation des éléments de détection est la partie technique la plus ardue. Un élément de 1024 voies est constitué de 4 matrices de diodes PIN, collées sur un PCB qui porte 16 ASICs assurant l'auto-déclenchement, la lecture, le stockage et la numérisation de chaque voie. Chaînés les uns aux autres, ils formeront des cassettes contenant jusqu'à 12 éléments. Ils doivent aussi assurer une alimentation et une transmission de signaux optimale sans détériorer le rapport signal sur bruit.

De nombreuses versions de PCB ont été développées et testées en faisceau au DESY et au CERN (2019–06, 2021–11, 2022–03, 2022–06) dans des configurations en couches ou en cassettes (cf la section électronique pour la description du prototype de "slab long" testé en 2019). Deux tests (2020–03, 2020–11) ont été annulés en raison de la COVID. Ils ont permis de graduellement améliorer les rapports signal sur bruit, la diaphonie et la stabilité. L'établissement des performances globales à haute énergie est difficile au vu du manque de moyen, de l'utilisation de prototypes hétérogènes et vieillissants [V le document-New results of the technological prototype of the CALICE SiW-ECAL]. La procédure de collage des galettes sur le PCB en particulier est en cours de complète réévaluation. Une

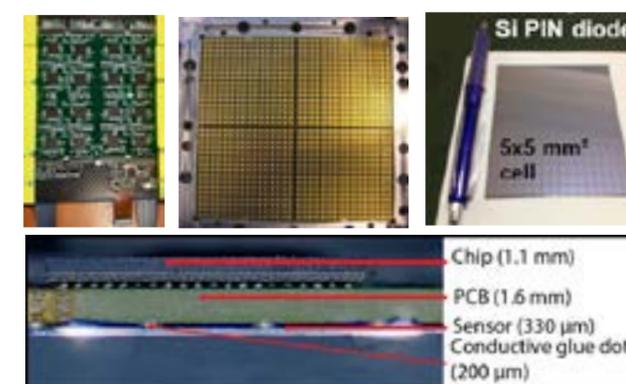


Figure 21 : (À gauche) Un des futurs 100 000 éléments de détection, avec ses 16 ASICs et une des cartes d'acquisition "ILD-like". (Au centre) L'envers de l'élément avec 1024 pads de lecture, chacun avec une goutte de colle conductrice. (À droite) Une des 4 matrices de diodes PIN. (À droite en haut) le profil de l'élément de détection assemblé.

ultime version du PCB est en cours de validation, intégrant des régulateurs de tension et promettant de finalement satisfaire l'ensemble des contraintes, électroniques et mécaniques. Cette version pourrait trouver des applications pratiques directes dans les expériences de QED et de recherche de "photons noirs" (LUXE@XFEL, Lohengrin@ELSA, EBES@KEK).

Historiquement, ILD et CALICE ont étudié des configurations adaptées à des collisionneurs linéaires (TESLA, ILC, CLIC), fonctionnant en mode pulsé, avec une extinction de l'électronique typiquement 99 % du temps. Un refroidissement passif des cassettes est alors suffisant. Les collisionneurs circulaires fonctionnant en continu, et la puissance additionnelle due

à l'ajout d'une mesure du temps précise, nécessitent de revoir complètement les estimations de puissance électrique et thermique, les flux de chaleur, de données dans les calorimètres. Un outil d'estimation de ces flux à partir de simulations détaillées est en cours, il participera à l'élaboration d'un design adapté de ILD pour le FCC-ee.

Les performances des détecteurs sont évaluées sur certains canaux de physique clés, représentatifs d'une classe d'événements (**Figure 22**). Pour le ECAL, deux d'entre eux sont particulièrement pertinents : ceux avec des τ 's dans l'état final, qui nécessitent la mesure de photons à proximité d'un hadron, et ceux avec des jets, puisqu'en moyenne 25 % de leur énergie est contenue dans

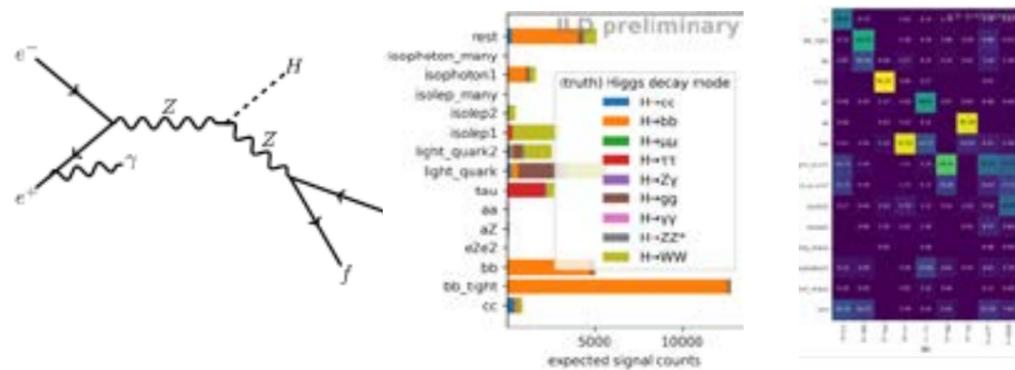


Figure 22 : (Gauche) Diagramme de Feynman du Higgsstrahlung. (Centre) Contribution des modes de désintégration du H aux principales topologies d'événement. (Droite) Matrice de corrélation.

des photons. Dans le passé, l'équipe du LLR a exploré la physique du τ pour plusieurs scénarios. Plus récemment, une thèse⁷ soutenue en octobre 2022 a porté sur la détermination non biaisée des rapports de branchement du Higgs, à partir des événements de Higgsstrahlung ZH avec le détecteur ILD à 250 GeV. À partir d'un échantillon sélectionné exclusivement à partir du Z ($\rightarrow ee, \mu\mu, \nu\nu$), un fit global des occurrences de principales topologies de désintégration du Higgs donne accès, par décorrélation,

⁷ Jonas Kunath, Thèse de doctorat, *Mesure directe des rapports d'embranchement des bosons de Higgs dans les collisions électron-positon à 250 GeV*, École polytechnique, IPP (Octobre 2022).

à ses rapports de branchement. En imposant une statistique multinomiale, le gain de précision est appréciable sur certains canaux, et vient en complément statistiquement indépendant des méthodes classiques n'utilisant pas les mêmes canaux de désintégration du Z.

3.1.7 La physique des saveurs dans l'expérience BaBar

La physique des saveurs dans le secteur des quarks demeure un sujet majeur de la physique des hautes énergies qui a longtemps directement intéressé les scientifiques du LLR. Le LLR a ainsi été impliqué dans l'expérience BaBar auprès de l'usine à B à Stanford en Californie (USA) qui a collecté des données entre

1999 et 2008. BaBar avait comme objectif principal l'étude de la désintégration faible des mésons beaux, c'est-à-dire contenant un quark b, et la violation de la symétrie CP dans ces désintégrations. L'expérience a effectué en particulier une métrologie de précision et fortement surcontrainte du triangle d'unitarité (longueur des côtés, angles) de la matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa), et démontré que le mécanisme CKM (4 paramètres) permet de comprendre la totalité des observables mesurées. Les analyses se sont poursuivies bien au-delà de l'arrêt des prises de données et ont fourni 32 publications de collaboration de 2018 à 2023. Les sujets chauds sont la violation de l'universalité leptonique dans la désintégration des mésons charmés, les mesures de production hadronique avec rayonnement dans l'état initial (ISR) en vue de préciser la "tension" sur le moment magnétique "anormal" du muon a_μ et la recherche (infructueuse à ce jour) de particules exotiques comme l'axion ou de l'Univers "sombre" (dark matter, dark photon). Deux chercheurs du LLR, Denis Bernard et Marc Verderi, sont toujours actifs au sein du comité éditorial (PubBoard) de la collaboration BaBar.

3.2 Physique des ions lourds

3.2.1 Contexte et objectifs

Le LLR est impliqué depuis les origines dans la physique des collisions d'ions lourds ultra-relativistes où il a été, entre autres, protagoniste de l'observation de la suppression d'états liés de quarks lourds dans la matière nucléaire à haute densité et haute température. Il s'agit d'une des manifestations attendues pour la production d'un nouvel état de la matière, le plasma de quarks et de gluons (QGP). Un état similaire à celui supposé présent dans les premières microsecondes après la naissance de

l'Univers, et qui prendrait la forme d'un plasma liquide dépourvu de viscosité, un liquide parfait.

La physique des ions lourds fait l'objet de programmes spécifiques au LHC. Des données proton-noyau (pA) et noyau-noyau (AA) ont été collectées au sein de l'expérience CMS au LHC au cours du Run 1 de $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV à $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, et jusqu'à $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV au Run 2. Le LLR a été par ailleurs pionnier de la physique des ions lourds en configuration cible fixe avec l'expérience LHCb, grâce au dispositif SMOG.

Les effectifs

Le groupe LHCb en physique des ions lourds dirigé par Frédéric Fleuret comprenait 3 permanents et 5 doctorants ou post-doctorants au 31 décembre 2023 :

- **Permanents** : Vladislav **Balagura**, Frédéric **Fleuret** et Émilie **Maurice**.
- **Post-doctorants** : Oscar Boente Garcia, Chenxi Gu, Rita Sadek Finot et Kara Mattioli.
- **Doctorants** : Qiuchan Lu.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Benjamin Audurier⁽²⁾, Felipe Garcia⁽¹⁾

⁽¹⁾Ph.D. ⁽²⁾post-doc

3.2.2 Physique des ions lourds dans l'expérience LHCb

Le groupe du LLR a rejoint officiellement la collaboration LHCb au début de l'automne 2020, mais son implication dans cette expérience remonte à 2015. L'équipe y est à l'origine d'un programme "cible-fixe" porté conjointement avec des collègues du laboratoire IJClab de l'université Paris-Saclay. L'équipe du LLR a concentré une grande partie de ses activités d'analyse sur la mesure de la production des hadrons charmés du programme "cible-fixe" de l'expérience LHCb. Elle est également très fortement impliquée dans la mesure de la luminosité délivrée à l'expérience.

Mesure de luminosité

Depuis 2016, Vladislav Balagura contribue

activement à la mesure de la luminosité. En 2020 il a déterminé la luminosité des données pp du Run 2 de LHCb et en 2021 des données PbPb acquises en 2018. Ces valeurs de luminosité sont utilisées pour toutes les publications Run 2 incluant des mesures de sections efficaces. Au cours des analyses, il a développé une nouvelle simulation des effets faisceau-faisceau au LHC et a montré¹ que l'ancienne approche était trop simpliste et conduisait à un biais d'environ 1% dans toutes les sections efficaces des 4 expériences du LHC publiées entre 2012 et 2019. Il a été l'un des examinateurs du LHCC TDR "Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity Detectors (BRIL)" pour la phase II de CMS.

¹ V. Balagura, Van der Meer scan luminosity measurement and beam-beam correction, *Eur. Phys. J. C* 81 (2021) 26.



Installation de SMOG2 dans la cavité de LHCb.

De 2019 à 2024, il a assuré la responsabilité du Physics performance working group luminosité de LHCb. Aujourd'hui, le groupe est composé d'une quinzaine de membres. Vladislav a développé une nouvelle méthode d'analyse pour prendre en compte l'augmentation de la luminosité instantanée au Run 3 en utilisant la fonction génératrice de probabilité. Il a également participé au design du détecteur de luminosité PLUME développé et installé par des collègues de l'IJClab. En décembre 2022, Rita Sadek (post-doctorante) a rejoint le groupe et participe activement à l'analyse de Van der Meer scans pour la détermination de la luminosité au Run 3.

Analyses de données en cible fixe

Pendant la période couverte par la présente revue, Émilie Maurice (post-doctorante de 2016 à 2019 ; enseignante-chercheuse à l'École polytechnique depuis 2019) et Frédéric Fleuret ont analysé et publié les premiers résultats de mesure de la production des mésons J/ψ et D^0 dans des collisions pAr et pHe

à 86.6 et 110.4 GeV respectivement², ainsi que de la production des mésons J/ψ , ψ' et D^0 dans des collisions pNe à 68.5 GeV³. L'équipe a également encadré la thèse de Felipe Garcia (2018 – 2021) sur la détermination de la centralité dans les collisions PbPb et PbNe⁴ et la mesure de la production des mésons J/ψ et D^0 dans les collisions PbNe⁵. Ces résultats, obtenus avec des échantillons statistiquement limités, ont permis de démontrer la faisabilité et la pertinence scientifique du programme cible-fixe de l'expérience. Pendant cette période, Émilie a été coordinatrice (2017 – 2019) du *Physics performance working group* luminosité, en charge de l'injection du

² LHCb Collaboration, First Measurement of Charm Production in its Fixed-Target Configuration at the LHC, *Phys. Rev. Lett.* 122 (2019) 132002.

³ LHCb Collaboration, Open charm production and asymmetry in pNe collisions at $\sqrt{s_{NN}}=68.5$ GeV, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 541 ; LHCb Collab., Charmonium production in pNe collisions at $\sqrt{s_{NN}}=68.5$ GeV, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 625.

⁴ LHCb Collab., Centrality determination in heavy-ion collisions with the LHCb detector, *JINST* 17 (2022)P05009.

⁵ LHCb Collab., J/ψ and D^0 production in $\sqrt{s_{NN}}=68.5$ GeV PbNe Collisions, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 658.

gaz, et Frédéric a été coordinateur (2018-2020) du *Physics analysis working group Ion and Fixed Target (IFT)* en charge de l'analyse des données ions.

En août 2021, durant le second grand arrêt du LHC, une cellule de stockage (SMOG2) développée par Pasquale Di Nezza (INFN) et son équipe a été installée en amont du détecteur de vertex. Cette cellule est une amélioration du système d'injection SMOG. En effet, elle permet d'injecter des gaz (nobles et non-nobles) dans un volume cylindrique de 1×20 cm, augmentant ainsi très significativement la densité locale de la cible, ouvrant la voie à un programme de physique étoffé.

À l'été 2021, Émilie Maurice a obtenu un financement ANR *Jeunes Chercheuses* pour son projet *THERMOFixed* dont le but principal est d'exploiter les données SMOG2 pour la physique du charme et du QGP. Dans ce cadre, Oscar Boente Garcia et Kara Mattioli ont rejoint l'équipe et ont contribué très activement depuis 2022 à la préparation de ces prises de données notamment pour la configuration des triggers cible-fixe (HLT1 et HLT2) ainsi que l'étape de pré-analyse (sprucing). Via un partenariat Eurotech avec EPFL (membre du groupe PLUME), Chenxi Gu, expert de la mesure des mésons charmés ouverts a rejoint l'équipe et participera à l'analyse des données SMOG2 de 2024. Chenxi

Une cible fixe dans LHCb pour l'étude de l'interaction forte

LHCb Collaboration,

[1] J/ψ and D^0 production in $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV PbNe collisions, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 658.

[2] Charmonium production in pNe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 625.

[3] Open charm production and asymmetry in pNe at $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV, *Eur. Phys. J. C* 83 (2023) 541.

[4] Centrality determination in heavy-ion collisions with the LHCb detector, *JINST* 17 (2022) P05009.

[5] First Measurement of Charm Production in its Fixed-Target Configuration at the LHC, *Phys. Rev. Lett.* 122 (2019) 132002.

En 2015 puis 2016, des physiciens du LLR ont rejoint la collaboration LHCb pour promouvoir et mettre en œuvre un programme de physique inédit au LHC. L'objectif principal est d'étudier de manière exhaustive la production des hadrons charmés dans les interactions des faisceaux de protons et d'ions du LHC sur des cibles fixes gazeuses.

Ce programme succède à ceux qui avaient été menés au SPS et au Fermilab à la fin du siècle dernier. Grâce aux améliorations techniques très significatives dont notre domaine a bénéficié lors des trois dernières décennies, certains sujets clefs pour notre compréhension de l'interaction forte, restés inexplorés en raison des limitations expérimentales de l'époque, peuvent aujourd'hui être étudiés.

Le laboratoire possède une longue et forte expertise dans l'étude de la production des saveurs lourdes dans les collisions de protons et d'ions lourds ultra-relativistes (expériences NA38, NA50, PHENIX). Notre projet qui s'est abondamment nourri de cette expertise a pour objet de répondre aux questions encore non résolues telles que l'existence de la suppression séquentielle des quarkonia dans un Plasma de Quarks et de Gluons. Les conditions cinématiques de la cible fixe et les performances exceptionnelles du détecteur LHCb, offrent par ailleurs des possibilités inédites d'explorer avec précision les mécanismes d'hadronisation et d'interaction des états liés de quarks dans le champ de couleur de la matière nucléaire. Ces études ont pour finalité d'améliorer notre compréhension du mécanisme de confinement

des quarks, propriété de l'interaction forte responsable de l'existence de la matière ordinaire.

Les cinq années passées nous ont permis de démontrer la faisabilité et l'intérêt du programme de physique proposé et ont abouti à la publication de cinq articles de la collaboration LHCb, tous issus d'études entièrement menées au LLR [1-5].

Aujourd'hui, l'expérience LHCb est équipée d'un nouveau système cible-fixe qui permettra, à partir de 2024 d'acquérir de grands échantillons statistiques pour mener ce programme ambitieux.

Production de charme ouvert et asymétrie $D^0-\bar{D}^0$

LHCb Collaboration, Open charm production and asymmetry in pNe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV, *European Physical Journal C* (2023) 83 :541 & *Ibid.* 83 (2023) 708 (erratum).

Dans cet article, dont l'analyse a été intégralement menée au LLR, la mesure de la production des mésons charmés D^0 est étudiée dans les interactions entre un faisceau incident de protons de 2.5 TeV et une cible de néon gazeux au repos, correspondant à une énergie dans le centre de masse des collisions nucléon-nucléon de 68.5 GeV.

En raison du boost induit par l'asymétrie d'impulsion entre le projectile et la cible, la couverture angulaire du détecteur donne accès, dans le centre de masse de la collision, à l'hémisphère arrière d'émission des paires $c\bar{c}$ (rapidité y^* négative), incluant la région de valence des quarks de la cible ($y^* \sim -2$). Dans cette région, un quark charmé, issu de la paire $c\bar{c}$ produite dans l'interaction primaire, serait susceptible, selon certaines approches théoriques, de s'hadroniser par coalescence avec un quark de la cible. Dans la région de valence du nucléon, la proportion de quarks u étant significativement plus grande que la proportion d'antiquarks \bar{u} , le mécanisme de coalescence devrait conduire à une asymétrie de production entre les mésons D^0 (état lié $c\bar{u}$) et \bar{D}^0 (état lié $\bar{c}u$), telle qu'observée dans la figure ci-dessous. La prédiction théorique MS, ajustée sur la mesure de la production du charme que nous avons préalablement effectuée en collisions pHe (PRL122 (2019) 132002), et incluant ce mécanisme de coalescence offre un accord raisonnable avec les données expérimentales.

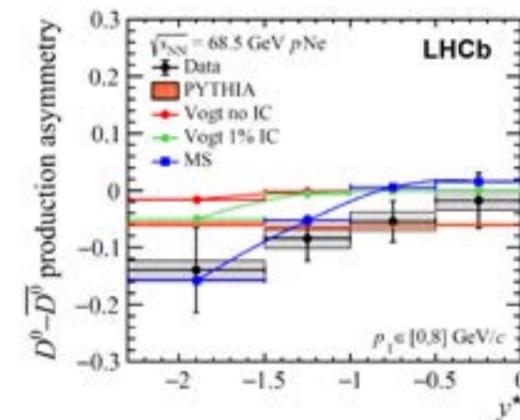


Figure 23 : Asymétrie de production entre les mésons D^0 et \bar{D}^0 et mesurée dans l'expérience LHCb.

Ces résultats, très encourageants, nécessitent d'être confirmés et raffinés avec l'acquisition d'un plus grand lot de données ainsi que la mesure des productions des D^+ mésons (état lié $c\bar{d}$) et D^- (état lié $\bar{c}d$) et des baryons Λ_c^+ (état lié cuu) et Λ_c^- (état lié $\bar{c}\bar{u}\bar{d}$) qui permettront également d'étudier l'asymétrie des quarks de la mer du nucléon et le mécanisme d'hadronisation à trois corps. Ce programme de mesure, incluant notamment des collisions proton-hydrogène, sera mis en œuvre avec la nouvelle cellule de stockage SMOG2 à partir de 2024.

participe également à la validation des données de PLUME et aux shifts de veille technique associés à ce détecteur.

Jouvence des détecteurs :

En décembre 2019, Benjamin Audurier (coordinateur du groupe IFT de 2019 à 2021) a rejoint le groupe pour un post-doctorat, dont une des activités consistait à effectuer les premières estimations de performances des upgrades de LHCb ("*First estimate of the LHCb performances in 5 TeV PbPb collisions at LHC Run 3 and HL-LHC*", B. Audurier, F. Fleuret, E. Maurice, LHCb-INT-2020 – 004) mettant en évidence les limites du tracking de l'Upgrade 1 LHCb pour la physique des ions lourds. Par la suite, le groupe s'est engagé (conjointement avec des collègues de l'Irfu et de Subatech) vers une contribution technique en vue de participer au remplacement de

l'Upstream Tracker (UT) de LHCb lors du Long Shutdown (LS4) du LHC. En s'appuyant sur la grande expertise du groupe électronique du LLR dans la caractérisation et l'étude de performances de capteurs, le groupe propose de participer aux tests et à la caractérisation des capteurs CMOS qui sont envisagés pour l'UT. Un apprenti ingénieur a été recruté en 2022 à cet effet.

3.2.3 Physique des ions lourds dans l'expérience CMS

Le programme de physique hadronique et des ions lourds dans CMS s'est poursuivi au cours de la période couverte par la présente revue. Les prises de données de collisions d'ions lourds ultra-relativistes ont repris à la fin de 2023 dans le contexte au Run 3 du LHC. Il faut remonter à 2018 et le Run 2 pour les données précédentes.

Les post-doctorants du groupe

Les effectifs

Le **groupe CMS pour la physique des ions lourds** piloté par Matthew Nguyen comprenait 2 permanents et 3 doctorants ou post-doctorants au 31 décembre 2023 :

- **Permanents** : François **Arléo**⁽¹⁾, Matthew **Nguyen** et Raphaël **Granier de Cassagnac**.

⁽¹⁾<09/2020

- **Post-doctorants** : Florian Damas.
- **Doctorants** : Bharadwaj Harikrishnan et Lida Kalipoti.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Cristian Baldenegro⁽²⁾, Leticia Cunqueiro Mendez⁽²⁾, Batoul Diab⁽¹⁾⁽²⁾, Guillaume Falmagne⁽¹⁾, Inna Kucher⁽²⁾ et Javier Martin Blanco⁽²⁾.

⁽¹⁾Ph.D. ⁽²⁾post-doc

continuent d'assumer des responsabilités de coordination ("niveau 3" dans CMS), Florian Damas étant le coordinateur du groupe "dilepton" et Cristian Baldenegro le coordinateur du groupe "forward", deux des cinq sous-groupes du groupe d'analyse de la "*Heavy-Ion Physics Analysis Group*" de CMS. Outre la coordination de la prise de données sur les ions lourds, Matthew Nguyen participe à la gestion du calcul hors ligne de CMS ("niveau 2" dans CMS), d'abord en tant que responsable de la reconstruction (2022 – 2024) et maintenant en tant que Offline Release Manager (2024 – 2026).

En tant que responsable du projet sur les ions lourds, Matthew Nguyen joue un rôle de premier plan dans les activités de prise de données de CMS. Pendant le long arrêt du LHC, un important travail a été fait pour améliorer le taux de prise de données d'ions lourds : un traitement partiel des données du trajectomètre a été intégré directement dans les algorithmes du déclencheur de haut niveau (L1 *trigger*) ; les informations en provenance des calorimètres à zéro degré ont également été incorporées dans le système global afin d'améliorer la pureté du déclenchement. Avec ce nouveau système en place, l'expérience CMS a été en mesure d'enregistrer en 2023 plus de 85 % des interactions hadroniques pour une sélection avec un biais minimum (*minimum bias data*), comparé à environ un tiers des événements en 2018. En outre, un énorme échantillon de "collisions ultra-périphériques" a été enregistré, ce qui élargit considérablement la portée du programme.

Jet quenching :

L'un des piliers du programme de collisions d'ions lourds de CMS est l'utilisation de jets pour étudier le plasma de quarks et de gluons (QGP) créé dans ces conditions. Dans des conditions normales, les partons, c'est-à-dire les quarks et les gluons, les constituants fondamentaux qui composent la majeure partie de la matière visible dans l'univers, sont confinés dans des états liés connus

sous le nom de hadrons. Cependant, lorsque la température et/ou la densité sont extrêmement élevées, les partons se retrouvent déconfinés. Les collisions ultra-relativistes d'ions lourds sont le seul moyen terrestre d'atteindre la température de déconfinement qui est d'environ 1 trillion K ! Afin d'étudier la chromodynamique quantique (QCD), la théorie fondamentale qui régit l'interaction entre les partons, on aimerait idéalement mesurer le pouvoir d'arrêt du QGP sur les partons énergétiques, de la même manière que nous mesurons le pouvoir d'arrêt des particules chargées dans la matière ordinaire.

Étant donné l'incroyable brièveté de la durée de vie du QGP (environ 1×10^{-23} s), le seul moyen d'obtenir cette configuration est d'utiliser des partons énergétiques créés par de rares diffusions avec un grand transfert d'impulsion à l'intérieur du QGP. Lorsque le confinement s'installe, ces partons énergétiques donnent naissance à des "jets", des jets collimatés de hadrons qui atteignent nos détecteurs. L'interaction des partons énergétiques avec le QGP entraîne la modification de ces jets, un phénomène connu sous le nom de "*jet quenching*", une sorte d'étouffement des jets de hadrons qui constitue l'une des meilleures fenêtres dont nous disposons sur la QCD dans le régime déconfiné.

Bien que le phénomène d'étouffement des jets ait été prédit dès 1982⁶, il a fallu attendre l'avènement des collisionneurs d'ions lourds pour que la section efficace des jets devienne suffisamment importante pour pouvoir observer ce processus⁷. La première observation de ce phénomène est venue de la suppression du rendement des particules à grande impulsion dans les collisions d'ions lourds.

⁶ J. D. Bjorken, *Energy Loss of Energetic Partons in Quark - Gluon Plasma : Possible Extinction of High $p(t)$ Jets in Hadron - Hadron Collisions*, 1982, FERMILAB-PUB-82-059-THY, FERMILAB-PUB-82-059-T.

⁷ PHENIX Collaboration, *High p_T charged hadron suppression in Au + Au collisions at 200 GeV*, Phys. Rev. C 69 (2004) 034910.

Cependant, ce n'est qu'avec l'arrivée des collisions à l'échelle du TeV au LHC que les jets sont devenus directement observables. Pour ces mesures, il s'est avéré que les expériences universelles CMS et ATLAS étaient idéalement adaptées grâce à leurs systèmes de calorimètres hermétiques. Les effets d'étouffement du jet sont si importants qu'ils sont immédiatement apparents au niveau de l'affichage graphique de l'évènement, comme pour l'évènement PbPb à la **Figure 24**. Cela a donné lieu à la première d'une série de publications sur le *jet quenching*, dans laquelle le groupe ions lourds de CMS au LLR a joué un rôle de premier plan. Après une première publication⁸, le groupe s'est tourné vers les jets de saveur lourde pour explorer la dépendance en masse et en saveur du *jet quenching*, l'une des meilleures façons de confronter les résultats aux modèles théoriques. Pour ce faire, le groupe a utilisé des jets de saveur lourde ouverts⁹, ainsi que des jets contenant un état lié de quark lourd¹⁰.

Tout en préparant le Run 3, le groupe a continué à exploiter les données du Run 2. Il a été stimulé par l'arrivée de Leticia Cunqueiro en septembre 2021, grâce à un financement ERC. Bien qu'elle soit repartie dès le mois de mai 2022 pour un poste avec promesse de titularisation à l'Université de Rome "La Sapienza", le groupe du LLR a continué à participer au projet ERC avec entre autres le post-doctorant Cristian Baldenegro et le doctorant Bharadwaj Harikrishan qui sont demeurés au LLR jusqu'à

⁸ CMS Collaboration, *Observation and studies of jet Quenching in PbPb collisions at nucleon-nucleon center-of-mass energy 2.76 TeV*, Phys. Rev. C 84 (2011) 024906.

⁹ CMS Collaboration, *Evidence of b-Jet Quenching in PbPb Collisions at 2.76 TeV*, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 132301, 1312.4198, [Erratum : Phys. Rev. Lett. 115, 029903 (2015)]; Idem, *Comparing transverse momentum balance of b jet pairs in pp and PbPb collisions at 5.02 TeV*, JHEP 03 (2018) 181, 1802.00707.

¹⁰ CMS Collaboration, *Fragmentation of jets containing a prompt J/ψ meson in PbPb and pp collisions at 5.02 TeV*, Phys. Lett. B 825 (2022) 136842.

l'automne 2023 et l'automne 2024, respectivement. Ces dernières années, le groupe des ions lourds de CMS s'est concentré sur l'exploitation des outils de sous-structure des jets afin d'améliorer notre compréhension du processus d'étouffement des jets. En particulier, à une certaine longueur de cohérence encore à mesurer, les partons colinéaires ne pourront plus être résolus par le QGP. On devrait pouvoir étudier cette échelle en "*déclusterisant*" les jets pour étudier les émissions individuelles dans la gerbe de partons. Ce projet se concentre sur l'utilisation de techniques modernes de sous-structure de jet pour étudier le phénomène d'étouffement des jets de hadrons (*jet quenching*). Cristian a effectué une mesure du *Lund Jet Plane*, peut-être l'étude la plus détaillée de la sous-structure des jets réalisée par CMS jusqu'à présent, et qui a récemment été soumise pour publication. Bharadwaj a effectué une mesure de la sous-structure des jets dans le canal g+jet, montrant qu'un rétrécissement qui avait été attribué au phénomène de *jet quenching* par d'autres expériences, dans des mesures inclusives, est en fait probablement dû à des biais expérimentaux.

La publication fondamentale de ce projet est l'étude du plan de jet de Lund dans les collisions pp, qui a été récemment acceptée pour publication¹¹. Cette étude récente, pilotée par un post-doctorant au LLR, est sans doute l'étude la plus détaillée de la sous-structure des jets effectuée dans l'expérience CMS à ce jour, et elle a fermement établi les régimes dans lesquels divers effets perturbatifs et non perturbatifs sont dominants (**Figure 25**). Deux doctorants travaillent désormais sur l'application des techniques de sous-structure des jets aux collisions d'ions lourds. Des premiers résultats de mesures g+jet suggèrent que la modification de la sous-structure des jets qui avait été

¹¹ CMS Collaboration, *Measurement of the primary Lund jet plane density in proton-proton collisions and pp collisions at 5.02 TeV*, 2023, Journal of High Energy Physics 05 (2024) 116.

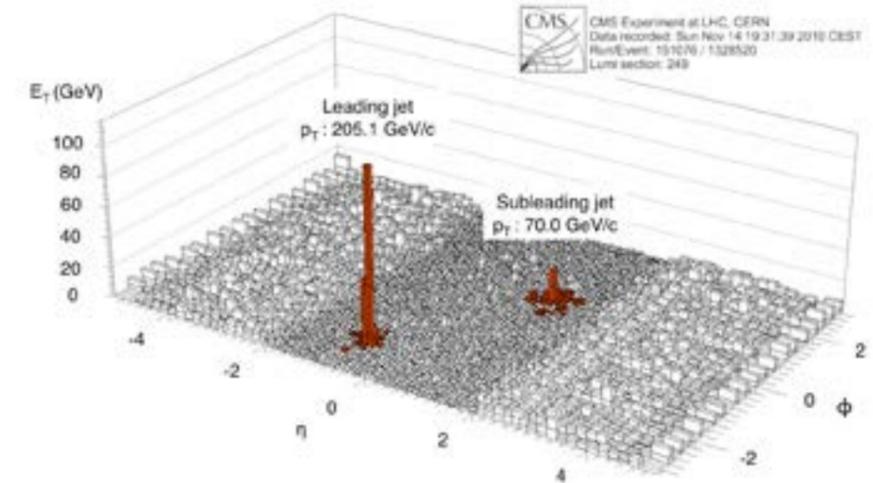


Figure 24 : Illustration d'un évènement de "jet quenching" observé dès les toutes premières collisions d'ions lourds au LHC [1] et présentant une collision PbPb dans le plan pseudorapidité (η) – angle azimutal (ϕ) du système calorimétrique de CMS. On y observe une paire de jets hadroniques avec un bilan déséquilibré en énergie transverse.

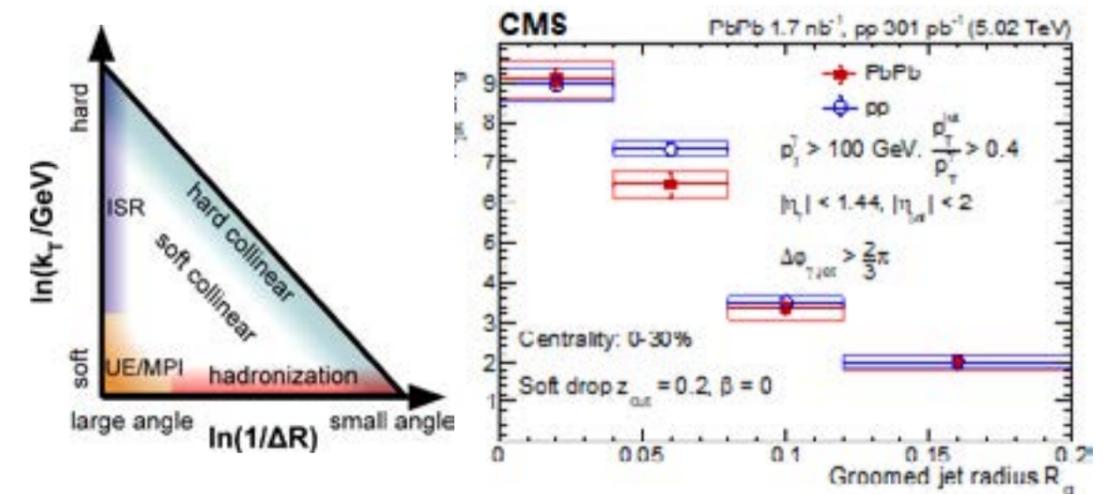


Figure 25 : À gauche : schéma des mécanismes affectant les différentes régions de l'avion à réaction de Lund [7]. À droite : Rayon (dit "groomed") du jet dans les collisions pp et PbPb montrant l'absence de modification de la sous-structure du jet.

observée¹² par les expériences ALICE et ATLAS a pu être due à un biais dans les mesures de jets inclusifs qui est atténué par l'utilisation de jets qui reculent en opposition à des photons directs. Une mesure de la sous-structure des jets de quarks lourds permettra par ailleurs de sonder le cône mort de rayonnement à proximité d'un quark lourd. Des résultats préliminaires sont attendus pour l'été

¹² ATLAS Collaboration, *Measurement of substructure-dependent jet suppression in PbPb collisions at 5.02 with the ATLAS detector*, Phys. Rev. C 107 (2023) 054909.

2024. Il ne s'agit là que d'un premier échantillon des études sur la sous-structure des jets en cours de réalisation. Nous attendons avec impatience d'autres études rendues possibles par les vastes échantillons de données enregistrés au cours du troisième cycle de prises de données du LHC.

3.2.4 Physique hadronique en collisions électron-ion

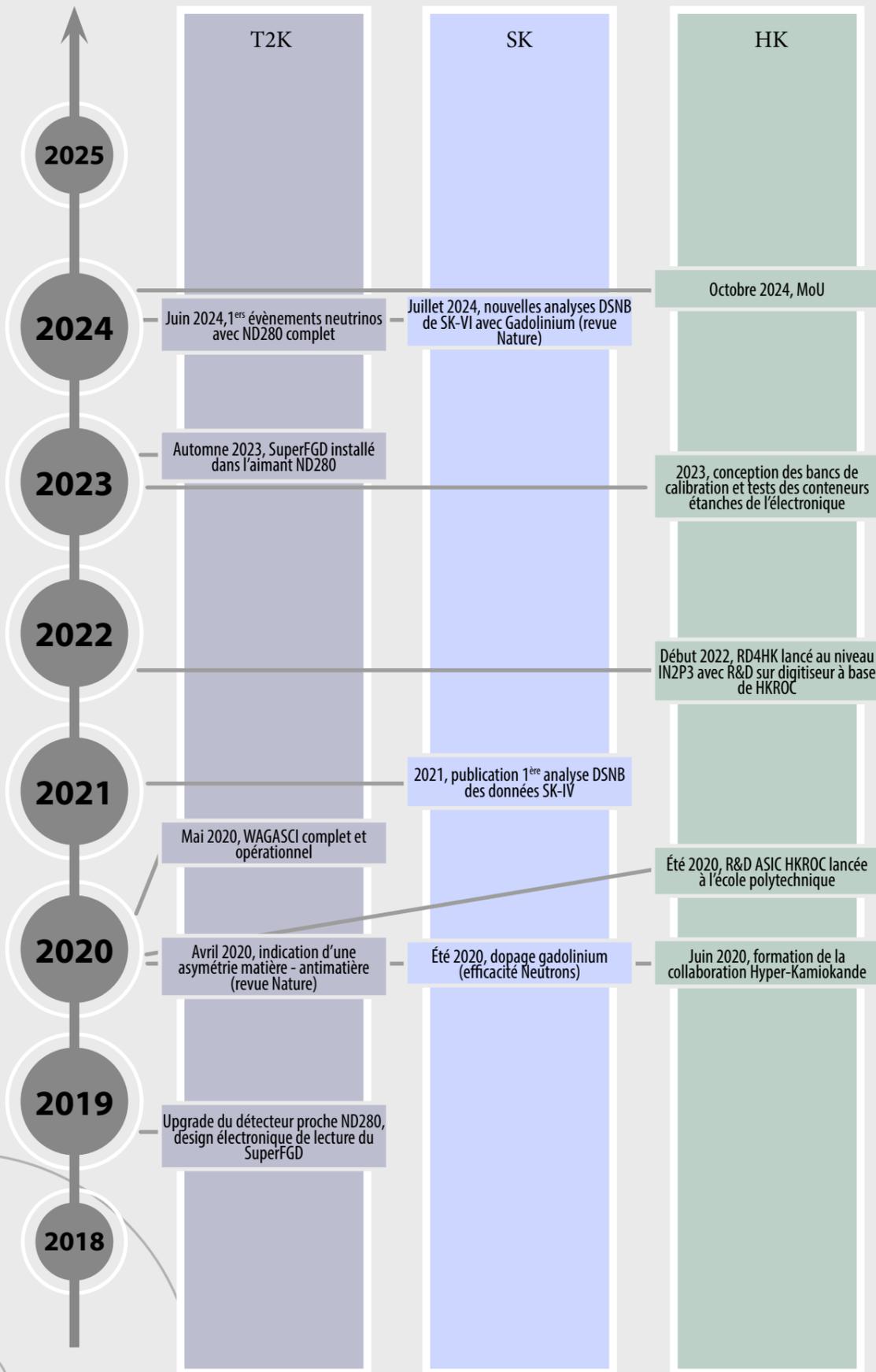
Un collisionneur électron-ion (EIC) est en cours de construction au Brookhaven

National Laboratory aux États-Unis pour étudier la structure du noyau atomique et de ses neutrons et protons. Il s'agit de reprendre et étendre le programme qui avait été développé auprès du collisionneur HERA à DESY et qui avait fourni des données entre 1992 et 2007. Le LLR a été fortement impliqué dans l'expérience H1 à DESY.

Si l'EIC reprend plusieurs des mesures de chromodynamique quantique (QCD) déjà effectuées par HERA, il sera en mesure de les améliorer radicalement en tirant parti, entre autres facteurs, de luminosités instantanées supérieures d'au moins deux ordres de grandeur. Il pourra par ailleurs permettre d'atteindre des densités de gluons plus élevées que HERA en utilisant des faisceaux de noyaux lourds plutôt que des protons. Un physicien du LLR (Matthew Nguyen) a rejoint la collaboration ePIC (Electron-Proton/Ion Collider Experiment) en mai 2024. Elle sera la première en fonctionnement auprès de l'EIC. Le LLR est intéressé en particulier par le calorimètre électromagnétique placé en embout, pour la mesure des électrons de diffusion inélastique profonde, et plus particulièrement par la caractérisation de l'électronique frontale. Dans un premier temps, il s'agit de tester l'adéquation d'un ASIC conçu par des collègues d'OMEGA pour ce calorimètre électromagnétique.



T2K, SK, HK : DATES CLEFS



3.3 Physique des neutrinos

3.3.1 Contexte et objectifs

Le LLR est impliqué dans les principales expériences souterraines de physique des neutrinos au Japon, dont T2K (Tokai to Kamioka) depuis plus d'une décennie, Super-Kamiokande (SK) depuis 2016 et Hyper-Kamiokande (HK) depuis 2020. L'une des principales motivations est la recherche de la violation de CP dans le secteur des neutrinos. La violation de CP est une condition préalable essentielle pour expliquer l'asymétrie entre la matière et l'antimatière observée dans l'univers. L'expérience T2K est une expérience dite à "grande ligne de base" qui exploite les faisceaux de neutrinos muoniques produits par l'accélérateur du J-PARC situé à Tokai. Pour étudier les oscillations des neutrinos, les particules produites par cet accélérateur sont dirigées vers le détecteur lointain SK situé à 295 km en aval. Un ensemble de détecteurs proches est utilisé pour estimer le nombre d'interactions attendues dans SK en l'absence d'oscillation. Le LLR a fortement contribué à la construction des détecteurs proches INGRID et ND280 ainsi qu'à l'expérience dédiée WAGASCI ("Water Grid and Scintillator") pour un meilleur contrôle des incertitudes systématiques liées à la connaissance limitée des sections efficaces d'interaction neutrino-noyau. L'expérience T2K a annoncé une première observation de l'oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ en 2013 et a publié les premiers signes de violation de CP dans le secteur des neutrinos en 2020, la conservation de CP étant exclue à un niveau de confiance de 90 %.

Le LLR a rejoint l'expérience SK en 2016 et participe principalement à la recherche du fond diffus de neutrinos de supernovæ (DSNB, *Diffuse Supernova Neutrino Background* en anglais) qui relie la physique des particules à l'évolution de l'Univers et à la cosmologie. Nous sommes également impliqués dans l'étude des oscillations des neutrinos atmosphériques et solaires. La détection

du DSNB revêt un caractère fondamental car celui-ci porte en lui, non seulement des informations cruciales sur les mécanismes d'explosion des étoiles mais également sur le taux de formation des étoiles, sur l'expansion de l'univers ainsi que sur certaines propriétés des neutrinos (hiérarchie de masse, propagation dans les milieux ultra-denses, ...).

Enfin, le LLR a rejoint l'expérience HK en 2020. Cette expérience est l'un des projets phares de la physique des neutrinos des 30 prochaines années. Elle reprend les bases des expériences T2K et SK avec trois différences majeures : une amélioration de la puissance faisceau, un détecteur plus grand et des tubes photomultiplicateurs plus performants. Cette expérience, localisée à quelques kilomètres de SK, prendra ses premières données en 2027. Son programme de physique est extrêmement vaste et comprendra *a minima* l'observation de la violation CP dans le secteur leptonique à 5 déviations standard ainsi que la mesure précise de la phase de violation CP, la mesure de la hiérarchie de masse des neutrinos, la mesure du spectre en énergie du DSNB, des tests de précision de l'unitarité de la matrice de mélange des neutrinos ainsi qu'une amélioration d'un facteur 10 de la sensibilité à la désintégration du proton.

Les effectifs

Les **groupes de physique des Neutrinos**, T2K dirigé par Margherita Buizza Avanzini et SK/HK dirigé par Thomas Mueller, comprenaient 5 permanents et 9 doctorants ou post-doctorants au 31 décembre 2023 :

- **Permanents** : Margherita **Buizza Avanzini**, Olivier **Drapier**, Michel Gonin⁽¹⁾, Thomas **Mueller**, Pascal **Paganini** et Benjamin **Quilain**.

⁽¹⁾<06/2021

- **Post-doctorants** : Anna Ershova, Quoc Viet Nguyen et Rudolph Rogly.

- **Doctorants** : Antoine Beauchêne, Denis Carabadjac, Andrés Muñoz, Léna Osu, Christine Quach et Andrew Santos.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Laura Bernard⁽²⁾, Jaafar Chakrani⁽¹⁾, Alice Coffani⁽¹⁾, Stephan Dolan⁽²⁾, Sonia El Hedri⁽²⁾, Alberto Giampaolo⁽¹⁾, Qinhua Huang⁽²⁾, Mathieu Licciardi⁽¹⁾, Guillermo Megias⁽²⁾ et Olivier Volcy⁽¹⁾.

⁽¹⁾Ph.D. ⁽²⁾post-doc

3.3.2 Physique des neutrinos dans l'expérience T2K

Les oscillations de neutrinos sont un phénomène de mécanique quantique qui décrit comment les neutrinos produits avec une certaine saveur peuvent être détectés avec une saveur différente après avoir parcouru une certaine distance. Les oscillations de neutrinos ont été découvertes il y a seulement 25 ans, lorsque la collaboration SK au Japon a observé la disparition des neutrinos atmosphériques. En moins de deux décennies, la physique des oscillations de neutrinos a été un terrain fertile pour d'énormes progrès et nous approchons maintenant ce qu'on appelle l'ère de la précision. En étudiant les oscillations de neutrinos, il est en effet possible de mesurer l'asymétrie CP (Charge-Parité) dans le secteur leptonique et, avec elle, de faire la lumière sur les raisons de l'asymétrie entre la matière et l'antimatière observée dans notre Univers. Il s'agit d'une question profondément liée à l'origine de notre propre existence ! Nous essayons de répondre à cette question avec T2K, qui est l'expérience pionnière dans ce domaine.

Située au Japon (au nord de Tokyo), T2K est une expérience de premier plan à l'échelle mondiale qui étudie

les oscillations des neutrinos grâce à l'accélérateur du J-PARC. Le faisceau de neutrinos est caractérisé par une série de détecteurs proches, puis mesuré à nouveau après 295 km de propagation par le détecteur lointain SK. L'objectif principal de T2K est la mesure précise de la disparition des (anti-)neutrinos muoniques et de l'apparition des (anti-)neutrinos électroniques. Ainsi, T2K mesure les paramètres d'oscillation des neutrinos avec une précision croissante et a déjà fourni les premières indications sur la phase de violation de CP (δ_{CP}) dans le secteur des neutrinos. Le résultat a été publié¹ dans la revue Nature en 2020.

Le groupe Neutrino du LLR est fortement impliqué dans les analyses des données et dans les études de sensibilité de T2K. Depuis 2017, Benjamin Quilain est l'un des responsables du groupe de travail de l'analyse d'oscillation, qui produit les résultats phares de T2K. Depuis 2018, Margherita Buizza Avanzini est l'une des responsables du groupe de travail qui mesure les sections efficaces avec les détecteurs proches de T2K. Avec environ 10 publications ces 5 dernières années, T2K est désormais, au-delà des oscillations de neutrinos, une expérience

¹ Nature Vol. 580 (2020) 339-344.

mondialement reconnue dans le domaine des mesures des interactions neutrino-noyau.

Les excellents résultats publiés par T2K, associés à l'approbation de l'expérience HK, ont incité la collaboration T2K à proposer une deuxième phase de l'expérience, qui comprend deux principaux projets de jeunesse des équipements :

- La mise à niveau de la ligne de faisceau de protons, qui permettra d'atteindre une puissance de 1,3 MW en 2027 (comparée à 500 kW en 2019) ;
- La mise à niveau du détecteur proche hors axe ND280, via le remplacement d'un sous-détecteur par un ensemble appelé "ND280-Upgrade".

Avec ces améliorations, une sensibilité de 3 déviations standard d'exclusion de la conservation de CP est attendue d'ici la fin de cette deuxième phase. Celle-ci a débuté à l'automne 2023 pour une durée de 4 ans. La quête de δ_{CP} se poursuivra grâce à HK, et les améliorations actuellement en cours seront également bénéfiques pour cette nouvelle expérience. En particulier, la mise à niveau de ND280 permettra de réduire les erreurs systématiques sur le flux et les sections efficaces dans l'analyse d'oscillation.

L'ensemble ND280-Upgrade est composé d'un détecteur scintillant entièrement actif et à haute granularité, le Super-FGD (Super Fine-Grained Detector), constitué d'environ 2 millions de cubes de scintillateur plastique de 1 cm³, traversés dans les trois directions par des fibres optiques. Celui-ci est intercalé entre deux nouvelles chambres à projection temporelles (Time Projection Chamber) à grand angle (HA-TPCs). Ce système de détection est orienté horizontalement, dans une direction parallèle au faisceau de neutrinos afin d'améliorer les capacités de reconstruction de ND280 pour les leptons sur tout l'angle solide. La lecture en trois dimensions et la segmentation fine du Super-FGD permettent une

excellente reconstruction des hadrons avec des seuils très bas. Le Super-FGD sera également capable de reconstruire les neutrons et de mesurer leur énergie par la mesure du temps de vol entre le vertex d'interaction des neutrinos et la diffusion des protons par les neutrons.

Parallèlement, un deuxième détecteur proche de T2K, nommé WAGASCI/BabyMind, a été installé à J-PARC fin 2019 et collecte désormais des données au même rythme que ND280-Upgrade. La particularité de ce détecteur est d'être constitué essentiellement d'eau, le même matériau cible que SK. Cela permet d'étudier et de caractériser les interactions des neutrinos dans l'eau, une étape fondamentale pour réduire les incertitudes systématiques et mesurer précisément les paramètres d'oscillation des neutrinos au détecteur lointain.

Le groupe Neutrino du LLR a participé à la réalisation des détecteurs proches de T2K depuis les origines du projet, avec des contributions majeures en électronique et en mécanique : INGRID (le détecteur sur axe, installé en 2009), WAGASCI, et depuis 2018 l'upgrade du ND280. Avec l'Université de Genève et sous la coordination d'Olivier Drapier, nous avons conçu, produit, testé, installé et démarré les cartes électroniques frontales de lecture du Super-FGD. Ces cartes très complexes et très compactes (24 x 19 cm), sont réalisées autour d'un FPGA (Intel Arria-10) et de huit circuits ASICs CITIROC, développés par OMEGA. Elles permettent la lecture de l'amplitude et du temps de 256 canaux chacune. Les signaux fournis par les quelques 57 000 détecteurs de photons (MPPC) du Super-FGD sont ainsi numérisés par un ensemble de 222 de ces cartes, regroupées dans 16 châssis placés de part et d'autre du volume actif. Après la conception et la réalisation des prototypes, une intense phase de test des performances a débuté en 2022 et s'est poursuivie avec la production, l'installation et la mise en route de 70 % des cartes à l'automne 2023, quand la première HA-TPC et le Super-FGD ont été

installés à J-PARC. Les premières données ont été récoltées en décembre 2023, et les premières interactions de neutrinos ont été enregistrées dans le ND280 amélioré, alors que le faisceau atteignait une puissance de 760 kW. Le détecteur est complet depuis l'été 2024.

3.3.3 Le détecteur Super-FGD de T2K et son électronique de lecture

La mesure de la phase de violation de la symétrie CP par T2K est actuellement limitée par les incertitudes statistiques découlant de la quantité de données enregistrées depuis le début de l'expérience. Cependant, avec l'augmentation de la puissance du faisceau à 760 kW, le prochain défi de l'expérience sera d'en limiter les incertitudes systématiques liées au calcul du nombre d'interactions attendues au détecteur lointain SK. L'un des éléments clés est la connaissance des sections efficaces d'interaction des neutrinos qui est mesurée au niveau du détecteur proche ND280. Dans le but d'améliorer

ces mesures, la collaboration T2K a entrepris la jouvence de celui-ci, avec l'ajout de 3 nouveaux ensembles de détecteurs :

- une cible active hautement segmentée faite de 2 tonnes de scintillateurs plastique (Super-FGD pour "Super-Fine Grained Detector"), permettant la mesure des traces des particules produites en trois dimensions ;
- deux chambres à projection temporelle à grand angle (HA-TPC, pour "High Angle Time Projection Chambers") ;
- six panneaux de détecteurs de temps de vol (ToF pour "Time of Flight").

L'ensemble de ces détecteurs (voir **Figure 26**) permet de mesurer les traces des particules dans un angle solide beaucoup plus isotrope que les détecteurs précédents, qui correspond mieux à l'acceptance de SK. De plus, le Super-FGD améliore notablement l'efficacité de détection des protons, et permet également la détection des neutrons et la mesure de leur énergie

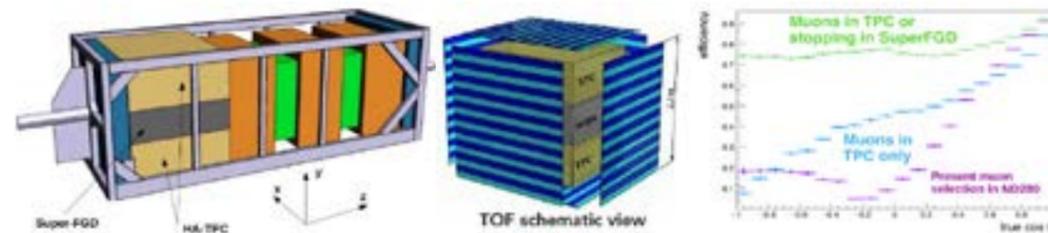


Figure 26 : Gauche : ensemble des détecteurs proches ND280, dans lequel la partie amont contient désormais le Super-FGD et les deux HA-TPC. Ces trois détecteurs sont entourés par le ToF (schéma au milieu). À droite, on peut voir en vert l'acceptance pour les muons obtenue grâce à ce dispositif, comparée à celle du détecteur ND280 d'origine, en violet.

grâce au temps de vol entre le vertex primaire et le proton de recul.

Le laboratoire a travaillé sur le détecteur Super-FGD. Celui-ci est composé de deux millions de cubes de plastique scintillant d'un centimètre de côté, parcourus chacun dans les trois directions par des fibres optiques à décalage de longueur d'onde. Ces 57 000 fibres sont lues à leur tour par autant de photodétecteurs en silicium (MPPC pour "Multi Pixel Photon Counter") situés à la surface de ce détecteur parallélépipédique

($1.92 \times 1.84 \times 0.56 \text{ m}^3$). Ce détecteur innovant a été conçu et réalisé par l'Institut de Recherches Nucléaires de Moscou. Les cubes de plastique scintillant sont recouverts d'un isolant optique à base d'oxyde de titane, et percés dans les trois directions. Ils sont ensuite assemblés en chaînes, puis en tapis d'environ 200×200 , à l'aide de fils de nylon. Les tapis sont ensuite disposés dans l'enceinte du détecteur et alignés verticalement grâce à des aiguilles métalliques. Lorsque l'enceinte

est refermée, les fils et les aiguilles sont remplacés par les fibres optiques, et les cartes supportant les MPPC sont apposées sur les faces. Ces dernières ont été développées par le groupe de

l'Université de l'État de Louisiane. Après la pose d'une barrière optique, les câbles transportant les signaux et la tension sont disposés à la surface du volume et sont conduits jusque sur les côtés. La

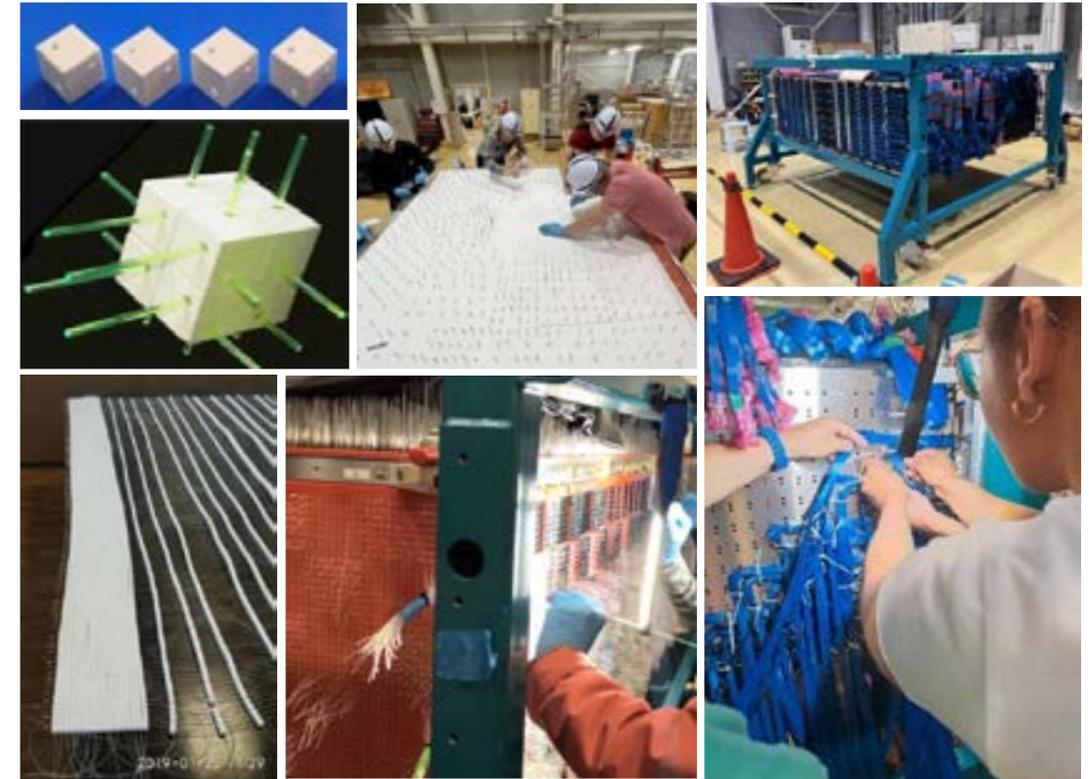


Figure 27 : En haut à gauche : quelques cubes et le principe de lecture par fibres à décalage de longueur d'onde. De gauche à droite : différentes étapes de la réalisation du détecteur en surface sur le site Japonais de J-PARC : les cubes d'un centimètre de côté sont enfilés sur des fils de nylon, d'abord en chaînes, puis à deux dimensions. L'assemblage en hauteur se fait grâce à des aiguilles métalliques. Après fermeture de la boîte, les fibres sont insérées, puis les cartes portant les MPPC sont apposées. L'ensemble du détecteur, recouvert de ses câbles, est visible en bas à droite.

Figure 27 montre quelques vues de ces étapes de construction. Le laboratoire a travaillé plus spécifiquement sur l'électronique frontale de lecture des 57 000 MPPC du Super-FGD, par la conception, la réalisation, les tests et l'installation de cartes dédiées, basées sur le circuit intégré CITIROC, développé par OMEGA. Ce travail a été réalisé par le groupe électronique du LLR, en collaboration avec le Département de Physique Nucléaire et Corpusculaire de l'Université de Genève. Le cahier des charges imposait des mesures de temps avec une précision de l'ordre de la nanoseconde, et d'amplitude de charge sur une dynamique de l'ordre de mille. La

place disponible pour cette électronique étant limitée à deux volumes de 30 cm d'épaisseur sur les côtés du détecteur, les principales difficultés de ce développement étaient la compacité et le refroidissement. La carte, appelée FEB (pour "Front-End Board"), d'une conception très complexe, est capable de numériser les signaux en temps et amplitude de 256 MPPC à l'aide de huit puces CITIROC dans une conception multicouche très compacte. Elle transmet également la tension de polarisation des MPPC et offre une lecture quasiment sans temps mort dans une configuration presque autonome. La carte produite en 240 exemplaires a été testée par une

équipe composée de membres des deux laboratoires et le détecteur est désormais complètement installé et équipé au Japon. La **Figure 28** montre la carte FEB et son plan de routage. Les 222 cartes nécessaires à la lecture des signaux sont regroupées en 16 châssis de 14 cartes,

chacun piloté par une carte contrôleuse OCB ("Optical Concentrator Board") reliée aux 14 FEB par un circuit de fond de châssis. Ces deux dernières cartes ont été développées par l'Université de Pennsylvanie.



Figure 28 : Routage de la carte FEB (gauche), et circuit entièrement équipé (droite). La carte est conçue autour d'un FPGA de type Intel ARRIA-10 (au centre de la carte), qui pilote les huit ASICs ("Application Specific Integrated Circuit") CITIROC visibles en haut du circuit. Les signaux sont transmis à la carte par les deux connecteurs situés en haut, et les échanges avec la carte contrôleur OCB se font par l'intermédiaire d'un fond de châssis connecté en bas. La plaque de cuivre en bas à droite est destinée à l'accueil de la carte fille qui fournit les tensions nécessaires au fonctionnement de l'ensemble.

Les cartes FEB ont une consommation nominale d'environ 20 W, et leur refroidissement est assuré par une plaque d'aluminium, conçue en collaboration avec l'Université de Genève et réalisée au LLR (**Figure 29**). Cette plaque est connectée thermiquement à deux barres refroidies par un circuit d'eau, situées en fond de châssis. La seule déconnexion nécessaire en cas de changement d'une carte FEB est ainsi l'ensemble de câbles de signaux de la carte considérée. Pour faciliter cette opération, ceux-ci sont regroupés sur une carte d'interface dite

MIB ("MPPC Interface Board") également conçue par le LLR et l'Université de Genève. Cette carte MIB est contenue dans un boîtier en aluminium afin de protéger les signaux des interférences électromagnétiques, formant ainsi une sorte de prise unique, connectée à chaque FEB.

Le Super-FGD, l'une des deux HA-TPC et quatre panneaux du ToF ont été installés pour la prise de données de tests de décembre 2023. Le Super-FGD était équipé pour cette période de 70 % de son



Figure 29 : Plaque de refroidissement réalisée au LLR, et son adaptation sur la carte FEB (gauche). La carte MIB, qui regroupe huit câbles de signaux pour les connecter à la carte FEB, grâce aux deux gros connecteurs situés sur l'autre face (droite).

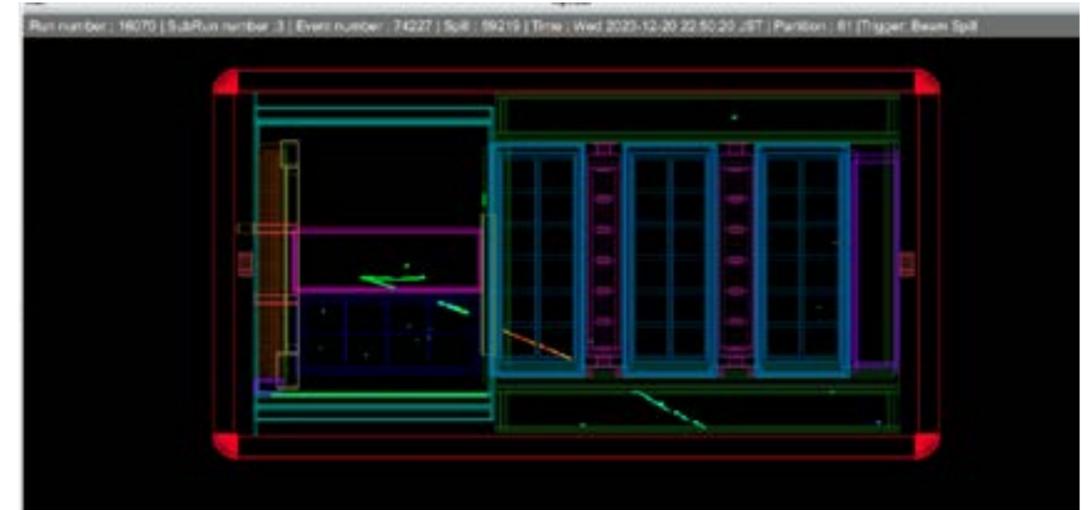


Figure 30 : Évènement candidat neutrino dans le Super-FGD. Le faisceau se propage de gauche à droite. L'interaction d'un neutrino du faisceau dans le Super-FGD (rectangle violet à gauche) donne naissance à un proton (trace du haut) et un muon (trace du bas), qui est ensuite détecté par la HA-TPC inférieure (rectangle bleu foncé), et par la première TPC verticale (rectangle bleu clair). La trace est enfin vue dans le calorimètre situé tout autour (rectangle vert foncé).

électronique. L'ensemble a fonctionné de façon tout à fait satisfaisante, comme le montre un exemple de traces résultant probablement de l'interaction d'un neutrino dans le détecteur, représenté sur la **Figure 30**.

L'électronique complète est désormais installée dans les seize châssis situés pour moitié de part et d'autre du détecteur (**Figure 31**), et est pleinement fonctionnelle.

3.3.4 Fond diffus de neutrinos de supernovæ dans SK

L'expérience SK utilise un détecteur de

neutrinos situé au Japon, dans la mine de Mozumi, près de la ville de Kamioka.

Ce détecteur est une énorme cuve cylindrique contenant 50 000 tonnes d'eau ultra-pure qui utilise l'effet Čerenkov pour détecter les particules. La lumière produite par les particules chargées se propageant plus rapidement que la vitesse de la lumière dans l'eau est détectée par environ 12 000 tubes photomultiplicateurs. Le détecteur a été mis en service en avril 1996 et fournit des résultats importants dans la physique des neutrinos depuis plus de 25 ans.

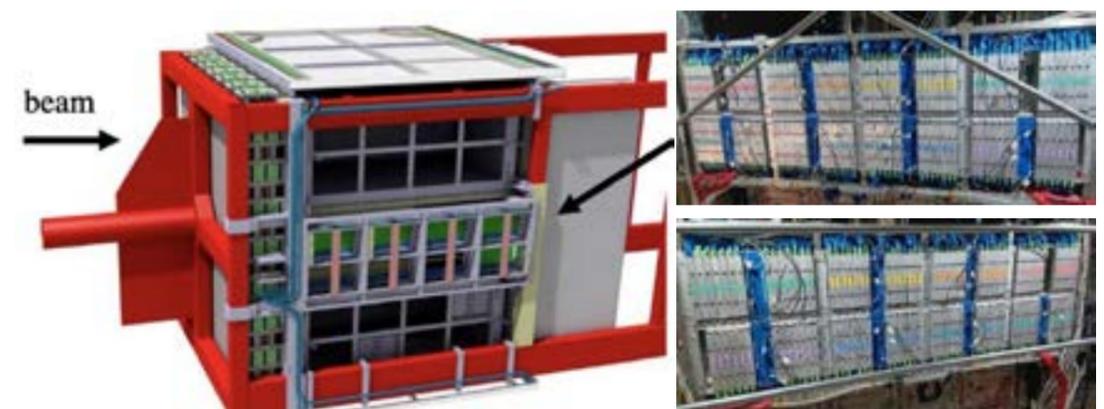


Figure 31 : Gauche : schéma de la disposition des châssis d'électronique du Super-FGD, qui montre ici les huit châssis du côté droit, également visibles en haut à droite. En bas à gauche : les huit châssis situés du côté gauche. On voit sur ces photos l'agencement des câbles bleus de signaux connectés aux faces avant des cartes FEB par l'intermédiaire de cartes d'interface MIB. Ces cartes d'interface sont situées dans des boîtiers en aluminium spécifiques afin de protéger les signaux des interférences électromagnétiques.

Contrainte sur la phase violant la symétrie matière-antimatière (publication T2K)

T2K Collaboration, *Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations*, *Nature* Vol. 580 (2020) 339-344

Si nous vivons dans un monde de matière, c'est parce que celle-ci a très vite pris le dessus sur l'antimatière, alors qu'elles ont été créées toutes deux en quantités parfaitement égales par le Big Bang, aux premiers instants de notre Univers. De forts indices d'une différence de comportement des neutrinos et des antineutrinos, les particules d'antimatière qui leur sont associées, sont rapportés le 16 avril 2020 dans *Nature*, dont ils font la couverture. Ils offrent une piste prometteuse pour expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière. "Ainsi s'ouvre le communiqué de presse" du CNRS d'avril 2020 qui rapporte les observations de l'expérience T2K publiées dans le journal *Nature* ; une expérience au sein de laquelle le LLR est fortement impliqué depuis les origines il y a plus de quinze ans.



Figure 32 : Couverture de la revue *Nature* d'avril 2020 avec une photographie du détecteur lointain de T2K et une référence aux nouveaux résultats concernant l'asymétrie matière-antimatière dans le secteur des neutrinos.

En effet, l'origine de la prédominance de la matière dans l'Univers n'est pas encore fermement établie. Certains modèles permettent d'en rendre compte grâce à la violation de la symétrie de charge-parité (CP) dans le secteur des leptons. Dans le cas de T2K, qui utilise alternativement des faisceaux de neutrinos et d'antineutrinos, une telle violation se traduit par une différence entre les oscillations de saveur de ces deux types de particules, détectées à une distance de 295 km par le détecteur SK. Selon les résultats de T2K, la conservation de la symétrie CP ($\delta_{CP} = 0$ ou π) est défavorisée pour la première fois à presque trois écarts standards comme le montre la figure ci-dessous.

Suite à cette publication, la collaboration a continué d'améliorer les techniques d'analyse, l'évaluation des systématiques, ainsi que la sélection des événements. Ces activités voient une participation majeure des membres du groupe du LLR, qui sont depuis des années en première ligne pour produire des résultats améliorés sur les paramètres d'oscillation, ainsi que pour préparer la deuxième phase de T2K

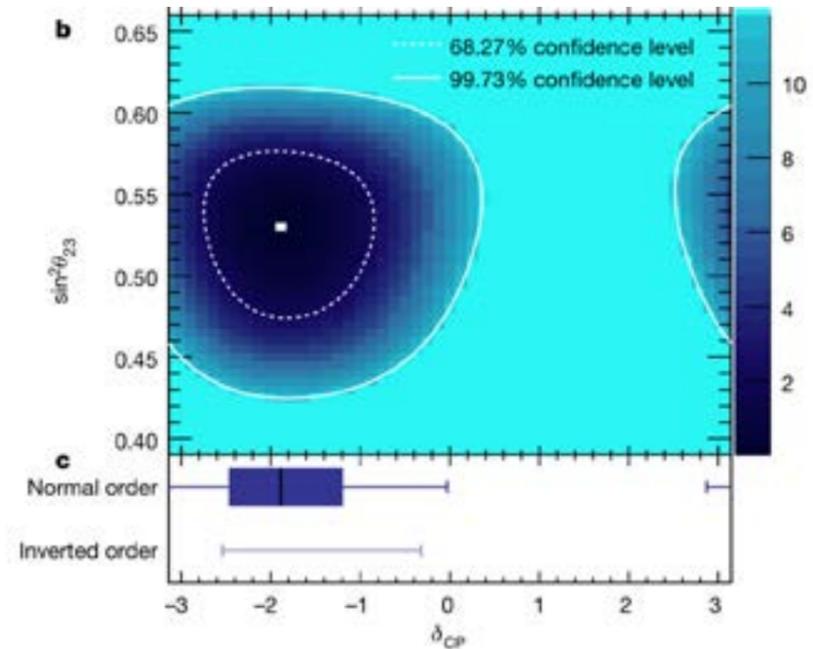


Figure 33 : Intervalle de confiance bidimensionnel aux niveaux de confiance de 68,27 % et 99,73 % pour δ_{CP} par rapport au sinus de l'angle de mélange θ_{23} , aussi mesuré par T2K ; l'échelle de couleur représentant la valeur de moins deux fois le logarithme de vraisemblance pour chaque valeur de paramètre. En bas : Intervalles de confiance unidimensionnels sur δ_{CP} à partir de l'ajustement T2K dans les deux ordres de masses des neutrinos (normal et inversé). La ligne verticale dans le cadre ombragé montre la valeur du meilleur ajustement de δ_{CP} , le cadre ombragé lui-même montre l'intervalle de confiance de 68,27 %, et la barre d'erreur montre l'intervalle de confiance de 99,73 %. Nous notons qu'il n'y a pas de valeurs dans l'ordre inversé à l'intérieur de l'intervalle de 68,27 %.

Section efficace de neutrinos muoniques en courants chargés (publication T2K)

T2K Collaboration, *Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K*, *Physical Review D* 101 (2020) 112004.

Actuellement la source principale d'erreur systématique dans l'expérience T2K - et dans d'autres expériences similaires basées sur des accélérateurs - est due à la connaissance limitée des sections efficaces des interactions neutrino-noyau. Comme exemple concret, dans notre article dans *Nature*, pour une incertitude systématique totale d'environ 9 % dans le canal d'apparition des neutrinos électroniques, 7 % étaient dus à l'une des systématiques des sections efficaces des neutrinos.

Le seul moyen de réduire ces incertitudes systématiques consiste à mieux comprendre les interactions neutrino-noyau, via des mesures plus précises et des modèles théoriques plus sophistiqués. La collaboration T2K est très active dans ce sens et, d'une part, continue de fournir de nouvelles et plus précises mesures des sections efficaces des neutrinos (10 publications depuis 2018) et, d'autre part, a mis à niveau le détecteur proche ND280. Le groupe neutrino du LLR est extrêmement actif dans ce

domaine et compte parmi ses membres l'un des coordinateurs du groupe travaillant aux mesures de sections efficaces dans T2K. Nous reportons ici la mesure des sections efficaces des neutrinos muoniques sur les noyaux de carbone et oxygène.

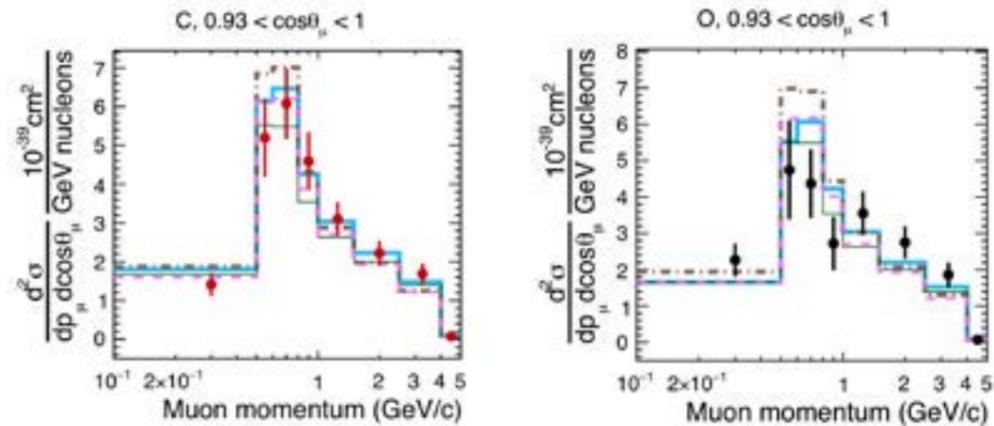


Figure 34 Section efficace des neutrinos muoniques mesurée simultanément sur le carbone (gauche) et l'oxygène (droite) pour les interactions à courant chargé sans émission de pions. La mesure est effectuée en deux dimensions : la direction ($\cos\theta_\mu$) et l'impulsion (momentum) du muon sortant. Les résultats sont montrés pour la direction vers l'avant. Les données (points) sont comparées à plusieurs modèles théoriques (lignes), ce qui montre que dans cette région cinématique, l'accord entre données et théorie est plutôt faible, surtout pour les modèles nucléaires les plus sophistiqués (χ^2 total d'environ 100 pour 58 degrés de liberté).

Cette analyse a été entièrement effectuée au laboratoire en utilisant les données collectées par le détecteur proche de T2K, notamment le trajectomètre du ND280 qui est majoritairement constitué de scintillateurs plastiques (CH) mais présente aussi des volumes d'eau. Étant donné que SK est un détecteur Čerenkov à eau, l'étude des sections efficaces des neutrinos sur l'eau est particulièrement importante. Celle présentée ici représente une des premières mesures simultanées sur deux noyaux différents, ce qui a inspiré une série d'autres analyses. Elle a permis de remarquer que les modèles théoriques actuels sont particulièrement faibles dans la reproduction des interactions à bas transfert d'énergie (correspondant à la région où la trace du muon est vers l'avant), ce qui a motivé l'adaptation de la paramétrisation des incertitudes systématiques pour les interactions neutrinos noyau, travail effectué encore une fois au LLR et documenté dans [1]. Cette nouvelle paramétrisation est devenue officielle dans l'analyse d'oscillation de T2K depuis 2022, comme cela sera décrit dans un article de T2K, actuellement en rédaction avec la participation des membres du laboratoire.

Référence citée dans cet article

[1] J. Chakrani et al, "Parametrized uncertainties in the spectral function model of neutrino charged-current quasi-elastic interactions for oscillation analyses", *Physical Review D* 109, (2024) 7, 072006.

En 1998, SK a annoncé la découverte du phénomène d'oscillation des neutrinos. Cette découverte sera récompensée par le prix Nobel de physique 2015. C'est une expérience extrêmement versatile qui fait de la physique dans une gamme en énergie allant du MeV au TeV : observation des oscillations de neutrinos solaires, atmosphériques et issus de faisceau (T2K), recherche des neutrinos issus de supernovæ, de sources astrophysiques et du fond diffus de neutrinos de supernovæ (Diffuse Supernova Neutrino Background, DSNB),

recherche de la matière noire et de la désintégration du proton.

Une supernova est une explosion cataclysmique qui se produit à la fin de la vie d'une étoile massive. Lorsqu'une étoile épuise son carburant nucléaire, elle peut subir plusieurs destins en fonction de sa masse. Dans le cas d'une étoile massive – d'au moins huit fois la masse de notre soleil – lorsque le carburant nucléaire dans son noyau est épuisé, la fusion thermonucléaire ne peut plus soutenir la pression gravitationnelle qui s'exerce sur lui. L'étoile commence alors à s'effondrer sous son propre poids. Cet effondrement peut être soudain et extrêmement violent. Dans certains cas, il peut provoquer une explosion qui libère une quantité d'énergie colossale en quelques secondes, équivalente à celle de milliards de soleils. Cette explosion s'accompagne d'une augmentation brève mais fantastiquement grande de sa luminosité. Vue depuis la Terre, une supernova apparaît donc souvent comme une étoile nouvelle, alors qu'elle correspond en réalité à la disparition d'une étoile.

Le groupe neutrino du LLR a été invité à rejoindre la collaboration SK en 2016 grâce à notre travail dans l'expérience T2K. Notre objectif de physique principal consiste en l'étude des neutrinos de supernovæ et en la détection du DSNB bien que nous soyons également impliqués dans l'étude des neutrinos atmosphériques et solaires. Lors d'une supernova à effondrement de cœur (CCSN pour "core-collapse supernova"), plus de 99 % de l'énergie émise l'est sous forme de neutrinos. Ces neutrinos, qui sont produits au cœur de l'étoile en train de s'effondrer s'échappent relativement facilement de la matière stellaire dense grâce à leurs faibles interactions avec la matière. L'observation de ces neutrinos joue un rôle crucial dans notre compréhension des phénomènes astrophysiques extrêmes, de la physique des neutrinos et de l'évolution stellaire. Ce phénomène, encore mal connu, libère

donc une quantité astronomique (10^{58} !) de neutrinos en quelques secondes. Le DSNB quant à lui est l'ensemble des neutrinos ayant été émis par l'ensemble des CCSN dans l'univers observable, il n'a pas encore été observé.

Puisque les neutrinos peuvent s'échapper de la zone dense de l'explosion bien avant que la lumière visible ne soit émise, ils sont des messagers directs des événements cosmiques. Ils permettent une observation directe et immédiate de l'événement, fournissant des informations cruciales sans délai. Ils portent également des informations sur les processus physiques se déroulant à l'intérieur de l'étoile en effondrement. Leur détection et leur analyse permettent donc de valider ou de réfuter les modèles théoriques de la dynamique des supernovæ, y compris la formation des étoiles à neutrons et la production d'éléments lourds. L'observation de ces neutrinos permet également de contraindre le mécanisme d'oscillation de saveurs et de tester les modèles de propagation des neutrinos dans les milieux de densité extrême. Enfin les neutrinos émis lors d'une supernova sont souvent accompagnés d'un flux de photons gamma et de particules chargées. La comparaison des signaux de neutrinos avec d'autres messagers astrophysiques permet une meilleure compréhension des processus d'accélération de particules et des environnements à haute énergie dans les sources astrophysiques.

Bien qu'il s'en produise une toutes les deux ou trois secondes dans l'Univers observable, les supernovæ sont des événements rares à l'échelle humaine : leur taux est estimé à environ une à trois par siècle dans la Voie lactée. Aucune supernova n'a été observée dans notre galaxie, depuis l'invention du télescope. La plus rapprochée observée depuis est SN1987a, survenue dans une galaxie voisine, le Grand Nuage de Magellan. Une vingtaine de neutrinos ont été observés à l'époque par trois détecteurs. Si une telle explosion se produisait dans

notre galaxie, un détecteur comme SK enregistrerait environ 8 000 neutrinos ce qui serait un évènement majeur pour notre domaine.

Néanmoins, nul besoin d'attendre la prochaine explosion pour étudier les neutrinos issus de supernovæ. Le DSNB est une composante de neutrinos cosmiques qui résulte de l'ensemble des supernovæ qui ont explosé à travers l'histoire de l'Univers. Ceux-ci étant des particules stables, nous baignons dans ce fond diffus de neutrinos qui a subi un décalage vers le rouge à cause de l'expansion de l'Univers. Au-delà des propriétés déjà mentionnées précédemment, concernant l'importance de la détection des neutrinos de supernovæ, la détection du DSNB apporte de précieuses informations supplémentaires sur divers aspects de l'astrophysique et de la cosmologie. Sa normalisation contraint par exemple le taux d'explosion des supernovæ et donc le taux de formation d'étoiles en fonction du temps c'est-à-dire la dynamique de l'évolution stellaire et la structure à grande échelle de l'Univers. Sa forme contraint les fractions de formation d'objets compacts tels les étoiles à neutrons ou les trous noirs. Enfin le DSNB porte en lui des contraintes sur les modèles cosmologiques.

La recherche du DSNB est l'un des programmes phares de l'expérience SK : le détecteur a subi une jouvence à l'été 2018 ainsi qu'un dopage en gadolinium (Gd) à l'été 2020 principalement dans la poursuite de cet objectif. La détection de neutrinos du DSNB se fait via l'observation de la désintégration bêta inverse (Inverse Beta Decay, IBD). Lors d'une IBD, un antineutrino électronique interagit avec un proton pour produire un positon et un neutron. Seule la détection en double coïncidence spatiale et temporelle de ces deux particules permet une réduction suffisante des bruits de fond et donc l'observation du DSNB. Jusqu'à l'été 2020, la détection du neutron était basée sur sa capture sur noyau d'hydrogène qui produit un

photon de basse énergie. Notre efficacité de détection de ce photon est au mieux de 25 %. Afin d'augmenter notre sensibilité à la détection du DSNB, SK a été dopé en Gd. Ce métal a une section efficace de capture des neutrons 150 000 fois plus grande que l'hydrogène et une signature en photons d'énergie beaucoup plus élevée dont l'efficacité de détection est d'au moins 90 %. Tout notre groupe a participé à la jouvence du détecteur – réparation des fuites, enlèvement des traces de rouille, changement des tubes photomultiplicateurs défectueux – pendant trois mois afin de permettre ce dopage en Gd. Un premier dopage de 13 tonnes a été réalisé à l'été 2020. Après avoir vérifié que la qualité de l'eau était stable et pris des données pendant deux années², un second dopage a été réalisé et la quantité de Gd dissoute dans l'eau a été portée à 40 tonnes nous permettant d'atteindre une efficacité de détection des neutrons d'environ 75 %.

Notre groupe a pris le leadership des deux analyses de recherche du DSNB, l'une d'elle étant indépendante de tout modèle et l'autre se basant sur un ajustement des différents modèles théoriques de prédiction du DSNB avec les données mesurées. Nous avons, entre autres, développé l'algorithme d'identification des captures neutroniques basé sur les techniques d'apprentissage machine (BDT), étudié les bruits de fond de spallation avec des outils de simulation dédiés (FLUKA, Geant4, MUSIC), mis en place des nouvelles coupures plus performantes de réjection des bruits de fond. Les premières analyses de recherche du DSNB sans Gd ont été

² K. Abe et al., First gadolinium loading to Super-Kamiokande, Nucl. Instrum. Meth. A 1027, 2022, p. 166248.

Recherche de bruit de fond diffus de neutrinos de supernovæ (publication SK)

Super-Kamiokande Collaboration, Diffuse supernova neutrino background search at Super-Kamiokande, Physical Review D 104 (2021) 122002.

Le fond diffus de neutrinos de supernovæ (DSNB) est formé par le cumulatif de tous les évènements de supernova à effondrement de cœur au cours de l'histoire de l'univers. Cette publication de 2021 de la collaboration SK présente la meilleure limite mondiale actuelle sur le flux du DSNB (Figure 35). Cette limite est comparée à l'attendu de différents modèles théoriques. Pour des neutrinos d'énergie plus grande que 17.3 MeV, la limite supérieure à 90 % de degré de confiance est de $2.7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$, et défavorise les modèles les plus optimistes.

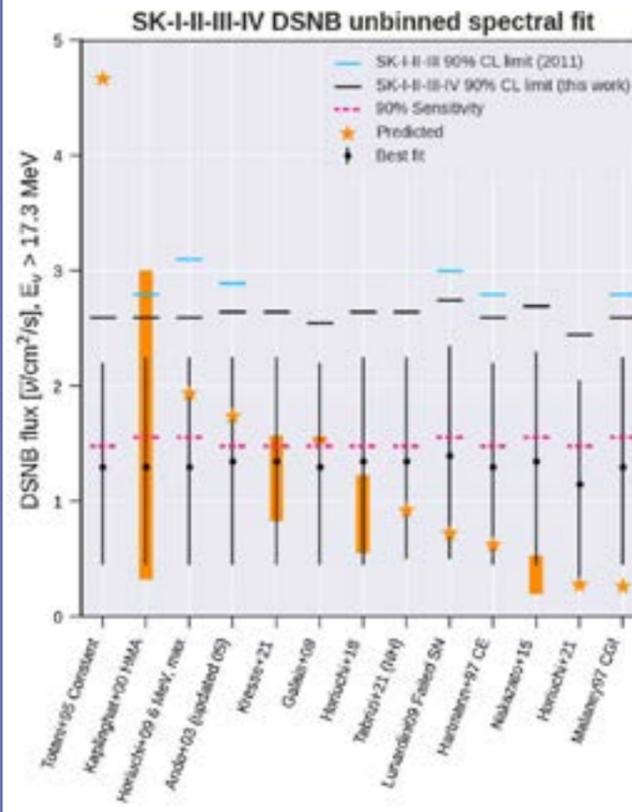
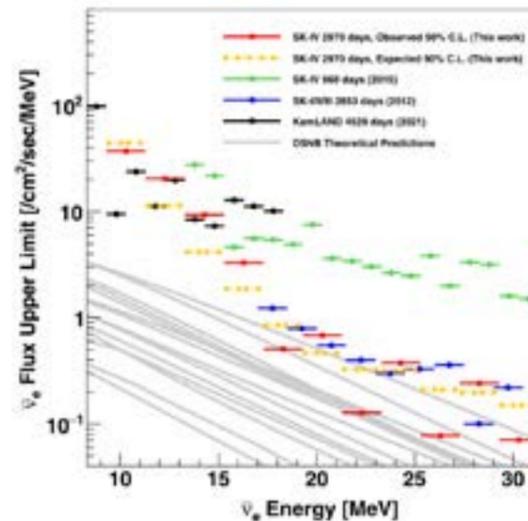


Figure 35 : (haut) Limites attendues et observées à 90 % de degré de confiance sur le flux d'antineutrinos électroniques du DSNB et comparaison avec les précédents résultats de SK, de KamLAND et des prédictions théoriques. (bas) Limites attendues et observées à 90 % de degré de confiance pour l'analyse spectrale réalisée par le groupe neutrino du LLR comparables aux prédictions des modèles Ando+03, Horiuchi09, Galais+10 et Kresse+21.

La publication, dont les deux "corresponding author" sont membres du LLR, couronne notre investissement dans la recherche du DSNB. Elle présente deux analyses distinctes de recherche du DSNB l'une d'elle étant indépendante de tout modèle et l'autre se basant sur un ajustement des différents modèles théoriques de prédiction du DSNB avec les données mesurées qui a été réalisée au LLR. Le groupe neutrino du LLR a, entre autres, développé l'algorithme d'identification des captures neutroniques basé sur les techniques d'apprentissage machine (BDT, **Figure 36**), étudié les bruits de fond de spallation avec des outils de simulation dédiés (FLUKA, GEANT4, MUSIC) et mis en place des coupures performantes de réjection des bruits de fond. Toutes ces contributions sont utilisées dans les deux analyses. Par exemple, l'implémentation du BDT pour l'identification des neutrons a permis une réduction d'un facteur 7 par rapport aux analyses précédentes.

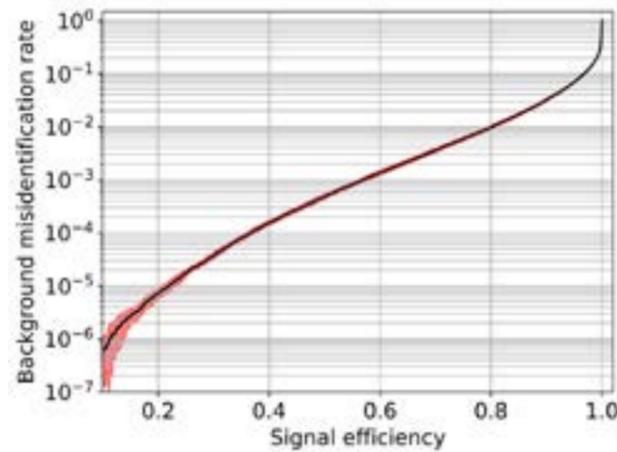


Figure 36 : Efficacité de détection des neutrons et fraction d'erreur pour le BDT développé par le groupe neutrino du LLR

Ces résultats sont extrêmement encourageants et nous permettent de nous projeter sur les analyses de recherche du DSNB avec les phases avec 0.01 % et 0.03 % de Gd qui seront présentées lors des conférences de l'été 2024.

publiées³ en 2021. Dans cette publication, dont les deux "corresponding authors" étaient membres de notre groupe, SK établit la meilleure limite mondiale sur le DSNB, limite atteignant déjà les modèles théoriques les plus optimistes. Le groupe a continué son leadership sur cette analyse phare. Nous sommes toujours responsables des deux analyses de recherche du DSNB : les résultats des phases avec 0.01 % et 0.03 % de Gd ainsi que la combinaison avec les données sans Gd ont été présentés lors des conférences de l'été 2024 et deux articles sont actuellement en cours de rédaction. Une analyse des données de la phase à 0.01 % de Gd basée uniquement sur des

³ K. Abe et al., Diffuse supernova neutrino background search at Super-Kamiokande, Phys. Rev. D 104.12, 2021, p. 122002.

coupures de sélection a été publiée⁴.

3.3.5 Perspectives pour les neutrinos dans HK

L'expérience HK est l'un des projets phares de la physique des neutrinos des 30 prochaines années. Elle reprend les bases des expériences T2K et SK avec trois différences majeures : une ligne de faisceau améliorée à 1.3 MW, un détecteur de volume fiduciel 8 fois plus important ainsi que des tubes photomultiplicateurs deux fois plus efficaces. Cette expérience, localisée à quelques kilomètres de SK, prendra ses premières données en avril 2027. Son programme de physique est extrêmement vaste et comprendra a minima : l'observation de la violation CP

⁴ M. Harada et al., Search for Astrophysical Electron

dans le secteur leptonique à 5 déviations standard (5δ) ainsi que la mesure précise de la phase de violation CP, la mesure de la hiérarchie de masse des neutrinos, la mesure du spectre en énergie du DSNB, des tests de précisions de l'unitarité de la matrice de mélange des neutrinos ainsi qu'une amélioration d'un facteur 10 de la sensibilité à la désintégration du proton.

Le détecteur HK est actuellement en cours de construction. Les travaux de construction de la caverne qui accueillera le détecteur ainsi que tous ses tunnels d'accès ont débuté au printemps 2021. La production des 20 000 premiers tubes photomultiplicateurs de 20 pouces a également débuté et 20 % de ceux-ci ont déjà été livrés et testés au printemps 2022.

L'équipe neutrino du LLR, souhaitant poursuivre les objectifs de physique déjà débutés avec les expériences T2K et SK et en améliorer leur compréhension, a naturellement décidé de prendre part à l'expérience HK. Nous travaillons depuis en collaboration avec les laboratoires LPNHE et OMEGA de l'IN2P3 ainsi qu'avec des laboratoires du CEA Saclay. Nos objectifs en termes de physique des neutrinos ainsi que nos contributions techniques à l'expérience ont été validés et plébiscités par le conseil scientifique de l'IN2P3 en octobre 2021 et 2022. Grâce à un support financier de l'École polytechnique obtenu en 2020, notre équipe s'est lancée conjointement avec les équipes des laboratoires OMEGA, DPP et DEPIP et en assumant le leadership dans le projet d'électronique frontale pour HK. Il s'agit d'un projet ambitieux et porteur d'avenir de développement de l'électronique de numérisation des signaux de tous les tubes photomultiplicateurs de HK basée sur le circuit ASIC (acronyme de l'anglais *application-specific integrated circuit*, littéralement "circuit intégré propre à une application") HKROC. Une solution complète a été présentée à la collaboration HK à l'été 2022 ! Ces développements ont offert une

visibilité maximale aux groupes français. La solution HKROC demeure aujourd'hui une option de réserve particulièrement intéressante pour la lecture des phototubes en physique des neutrinos grâce à des performances exceptionnelles démontrées supérieures à celles des solutions concurrentes. Le circuit HKROC pourra être utilisé pour les détecteurs proches de HK et sera bientôt disponible sur le marché des composants électroniques pour de futures expériences utilisant la technologie des détecteurs Čerenkov à eau. Notre groupe a également pris le leadership sur les algorithmes de reconstruction, à la fois à basse et haute énergie, de l'expérience nous garantissant une place majeure dans les futures analyses des données de HK. Nous avons également pris la responsabilité d'un système de bancs de tests de l'électronique frontale de HK qui permettra de valider, de caractériser et d'étalonner, au CERN, toutes les cartes électroniques qui seront utilisées dans HK. Le développement du système est en cours pour pouvoir commencer les tests au début de l'année 2025.

A l'été 2021, Michel Gonin a quitté notre groupe afin de prendre la direction du laboratoire international (IRL) ILANCE situé sur le campus de Kashiwa de l'Université de Tokyo au Japon. Ce laboratoire, créé en 2021 et financé dans le cadre d'un accord CNRS-Université de Tokyo, permet de développer et de renforcer la coopération internationale entre les scientifiques français et japonais. Il permet d'accueillir des chercheurs français pendant des périodes longues au Japon et de réduire l'empreinte carbone liée au trafic international de personnes. La création d'ILANCE coïncide de façon optimale avec le développement du projet HK et nous permet déjà de passer plus de temps au Japon afin de garantir un investissement maximal de notre équipe.

3.3.6 Le numériseur d'onde HKROC

HKROC est un numériseur de forme

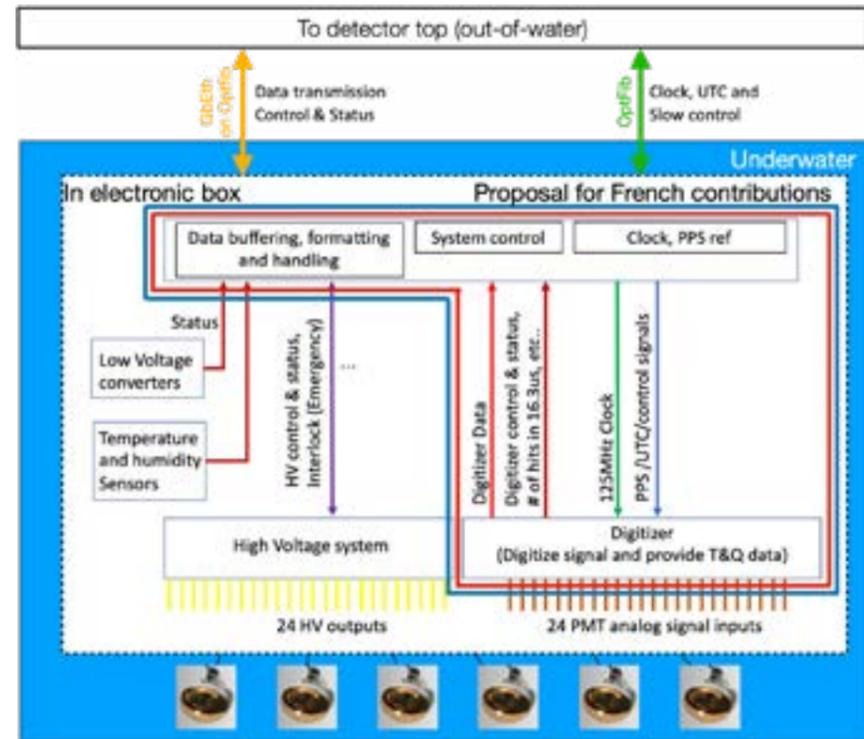


Figure 37 : Schéma de l'électronique frontale de HK avec les blocs fonctionnels mis en avant. Les contributions françaises qui ont été proposées sont entourées d'une boîte tricolore.

d'onde moderne pour des expériences avec des tubes photomultiplicateurs

L'électronique frontale du détecteur HK – qui lit les informations des tubes photomultiplicateur (PMT, *Photomultiplier Tube*) – sera placée dans des boîtes étanches sous l'eau. La Figure 37 montre la disposition générale de l'électronique sous-marine. La contribution du LLR a été décidée en 2020, et nous avons l'intention de contribuer à l'électronique par la numérisation et l'encodage des données en charge et en temps des PMTs.

Le développement de l'électronique au LLR visait à relever trois défis majeurs :

- Extraire tout le potentiel d'HK, de quelques MeV à une gamme d'énergie de plusieurs GeV, sans compromettre la mesure de la charge ou la résolution temporelle,
- Avoir une très grande fiabilité car les activités de maintenance n'interviendront probablement qu'une fois tous les 5 à 10 ans,
- Concevoir une carte de numérisation quasi universelle, qui pourra équiper

non seulement HK, mais aussi toutes les expériences basées sur la lecture de PMTs dans les 15 années à venir.

Ce projet a été proposé conjointement avec les laboratoires OMEGA et CEA-DPhP, avec lesquels nous avons un historique de collaboration très fructueux, par exemple pour les détecteurs WAGASCI, Super-FGD ou CMS. L'ensemble du développement et des performances de cette électronique, depuis ses performances sur HK jusqu'à son évolution comme numériseur universel, est présenté plus en détail dans la suite.

3.3.6.1 L'ASIC HKROC

Nous avons proposé de développer une carte frontale de numérisation basée sur un nouvel ASIC dénommé HKROC. La puce HKROC combine les dernières technologies de pointe pour s'adapter aux exigences de HK et les avantages d'une solution ASIC: moindre risque de défaillance, durabilité à long terme, commodité, faible consommation d'énergie, etc. Les exigences de

l'expérience HK peuvent être brièvement résumées comme suit :

- Une large gamme dynamique (de 0 à 2 500 pC) permettant de couvrir toute l'étendue de la physique d'HK du MeV jusqu'à la centaine de GeV avec une linéarité de mesure de la charge meilleure que 1 %.

- Une résolution temporelle inférieure à 300 ps pour être négligeable par rapport à la résolution temporelle des PMTs de HK (1,1 ns).
- Un temps mort inférieur à 1 μ s afin de détecter les neutrinos provenant d'une supernova proche (comme par exemple Bételgeuse) avec une perte

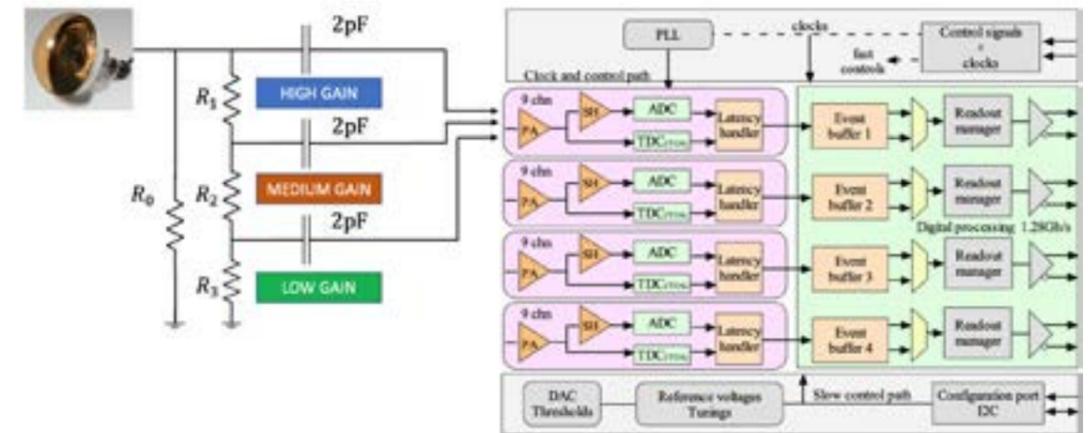


Figure 38 : Schéma de la puce HKROC.

d'information minimale, de maximiser l'efficacité de détection des électrons de désintégration, ou encore de pouvoir séparer la lumière directe de la lumière réfléchiée et diffusée dans le détecteur.

Cette puce a été développée par les groupes des laboratoires OMEGA et CEA-DEDIP sur la base de la puce HGCROC existante qui équipera le futur calorimètre à haute granularité de l'expérience CMS. La carte hôte est développée par le LLR. La puce HKROC est gravée en CMOS TSMC 130 nm, ce qui permet de minimiser le temps mort de lecture et de réduire le bruit électronique et la diaphonie entre les canaux. Le schéma de la puce est présenté sur la Figure 38.

Chaque PMT est lu par trois "canaux électroniques", couplés à une résistance différente afin de fournir des canaux à gains élevé, moyen et faible. Avec ses 36 canaux électroniques, HKROC permet donc de lire 12 PMTs. Pour chaque canal électronique, la signal de la charge

de sortie du PMT est amplifié par un préamplificateur à faible bruit dont le gain est réglable puis passe par un dispositif de mise en forme qui étire et corrige les variations de la forme du signal en fonction de la charge d'entrée.

Chaque canal électronique dispose d'un déclencheur indépendant qui est activé lorsque le signal franchit une valeur seuil ad hoc. Lorsqu'un canal est déclenché, tous les canaux reliés à la même liaison à grande vitesse sont numérisés (c'est-à-dire 3 signaux PMT dans la version actuelle de la puce). Pour chaque déclenchement, le temps de réponse est fourni par la combinaison d'un horodatage grossier et d'un horodatage fin. L'horodatage grossier est commun à tous les canaux et est fourni par un FPGA (acronyme de l'anglais *field-programmable gate array*, qui est un circuit logique programmable) au moyen d'une horloge de fréquence 40 MHz. L'horodatage fin est fourni indépendamment pour chaque canal indépendamment en utilisant un CTN

(Convertisseur Temps-Numérique, ou TDC en anglais) de 10 bits. La combinaison des deux permet d'atteindre une résolution temporelle inférieure à 200 ps.

La charge est numérisée à 40 MHz à l'aide d'un CAN (Convertisseur *Analogique-Numérique*, ou ADC en anglais) de 10 bits dont l'horloge est asynchrone avec le temps de déclenchement. La charge du signal n'est pas intégrée. Au lieu de cela, la forme d'onde est numérisée par N points d'échantillonnage (1, 3, 5 ou 7) séparés de 25 ns. La charge et le temps, attachés à une même liaison série, sont lus à 1,28 Gb/s et envoyés au FPGA.

3.3.6.2 La carte électronique HKROC

La carte de numérisation HKROC, développée au LLR, résulte d'une stratégie du groupe électronique vers le développement d'une carte générique et universelle, qui peut être utilisée comme modèle non seulement pour lire les PMTs, mais à l'avenir, tout autre type de photo-capteur utilisé dans la physique des hautes énergies, moyennant une modification mineure de la conception de la carte.

Elle est pilotée par un système d'horloge fonctionnant à 125 MHz et synchronisée par une balise permettant l'horodatage des événements. Ces signaux proviennent de l'horloge maître et de la carte de contrôle. La carte utilise

l'horloge de 125 MHz pour générer une horloge à 40 MHz qui est distribuée à la puce afin de piloter le CAN. Chaque carte est équipée de 2 puces HKROC afin de pouvoir lire les signaux de 24 PMTs. Le front-end configure l'ensemble de la puce via un port esclave I2C, en définissant le seuil de déclenchement du canal, en réglant le gain du préamplificateur, etc. Les données numérisées de chaque puce HKROC sont lues par 4 liaisons série vers un FPGA Xilinx afin de faire face au débit de données élevé de HK. Le FPGA sélectionne uniquement le canal déclenché, reconstruit sa charge sur la base de la forme d'onde numérisée et envoie l'information de la charge et du temps à la DAQ.

L'équipe du LLR a d'abord développé la toute première carte (nommée version 0) ainsi qu'un banc d'essai afin de caractériser complètement l'ASIC. Sur la **Figure 39**, on peut voir l'ASIC HKROC monté sur une carte mezzanine à l'aide d'un processus flip-chip. Cette carte mezzanine est elle-même montée sur une carte mère qui est finalement connectée à une carte de test Xilinx Kintex UltraScale FPGA KCU qui gère la communication avec l'ASIC, fournit les horloges différentielles (320 MHz) à partir de l'horloge distribuée de 125 MHz, permet d'envoyer des paramètres de contrôle et de lire les données



Figure 39 : Carte de test (appelée version 0) de l'ASIC HKROC.

numériques sortant de la puce.

Le développement extrêmement rapide et réussi de cette carte a permis aux équipes du LLR de caractériser l'ASIC en seulement 2 mois et d'en démontrer ses capacités exceptionnelles.

Après cette campagne, nous nous sommes orientés vers notre objectif final de développement d'une carte intégrée et universelle pour pouvoir numériser les signaux de n'importe quelle expérience basée sur la lecture de photodétecteurs. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons



Figure 40 : Carte intermédiaire (appelée version 1) de numérisation HKROC.

procédé à une approche sécurisée en deux étapes :

- Une carte intermédiaire version 1, intégrant toute la partie analogique du numérisateur et la numérisation par l'ASIC. L'alimentation électrique et le traitement par FPGA sont toujours réalisés avec la carte KCU.
- Une carte finale version 2, intégrant le FPGA, l'alimentation électrique ainsi qu'une mémoire DDR (Double Data Rate en anglais) afin de faire face à des taux d'événement extrêmement importants pouvant survenir dans le cadre d'une explosion de supernova.

La carte de numérisation intermédiaire –version 1– a été développée afin de lire 12 PMTs, ce qui permet d'exploiter pleinement tous les canaux de l'ASIC. Elle est visible sur la **Figure 40**. Pour chaque canal, un circuit de protection a été ajouté à la carte afin de protéger l'ASIC de toute surtension inattendue et ce jusqu'à 80 V. Les canaux de la carte ont été alternés sur deux plans afin de minimiser le risque de diaphonie entre les canaux, ce qui constitue la plus grande amélioration

par rapport à la carte de test. Enfin, la carte a été conçue avec un socket dédié à faciliter le test de plusieurs ASICs.

La version 2 de la carte numérisateur est destinée à être la carte finale permettant de lire les signaux des PMTs. Les **Figures 41 et 42** montrent une vue schématique de sa conception. Par rapport à la carte intermédiaire décrite dans la section précédente, cette carte :

- Intègre le traitement des données numériques dans un FPGA et l'ensemble de l'alimentation ;
- Possède un filtrage numérique directement codé dans le FPGA (il est effectué hors ligne pour les autres cartes) ;
- Possède une DDR ainsi qu'une interface associée avec le FPGA afin de faire face à des taux d'événements supérieurs à 1 Mhz ;
- A fait l'objet d'une étude complète et une optimisation de la dissipation d'énergie.

L'équipe électronique du LLR a finalisé la conception de la carte et l'a envoyée en production au printemps 2024.

3.3.6.3 Tests de performance et résultats

Dans cette section, les performances de la solution HKROC sont comparées aux exigences de HK, qui étaient extrêmement strictes. La **Figure 43** résume la liste complète des performances mesurées

du HKROC. Comme nous le soulignerons dans les lignes qui suivent, le numériseur HKROC répond à toutes les exigences d'HK. L'accent est mis sur quatre aspects : la numérisation du temps et de la charge, le temps mort et la durabilité de l'ASIC.

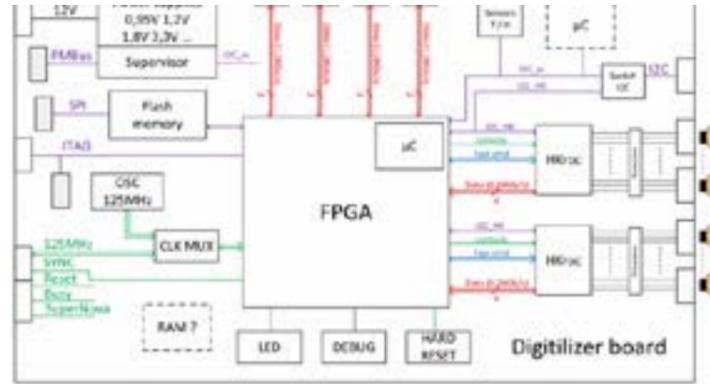


Figure 41: Numériseur HKROC version 2. Vue schématique du numériseur.

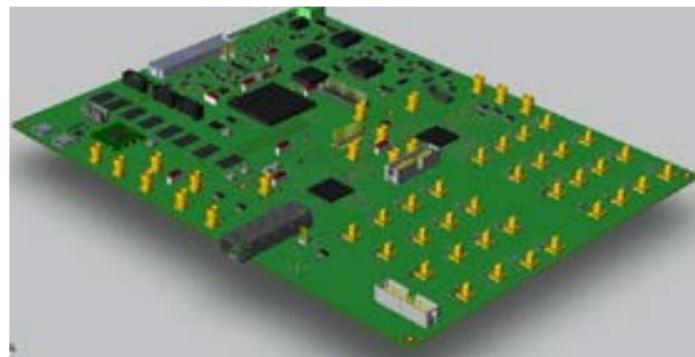


Figure 42: Vue 3D du numériseur.

Afin de maximiser la détection d'évènements de faible énergie, le seuil de détection peut être abaissé dans HK jusqu'à 1/6 de photoélectrons (p.e.), et la collaboration exige un bruit accidentel inférieur à 1 Hz tout en conservant une efficacité de 100 % pour un signal supérieur à 0.25 p.e. La **Figure 44** présente l'efficacité de détection pour différents seuils, et en particulier montre que les signaux de 0.25 p.e. sont reconstruits avec une efficacité de 100 %. En fait, la courbe en S a fourni un seuil théorique de 1/26 p.e.! En parallèle, le taux de déclenchement accidentel a été mesuré inférieur à 0,1 Hz: HKROC est donc considérablement moins bruyant que ce que demande HK.

La contrainte sur la résolution temporelle de la carte de numérisation a été fixée

inférieure à 300 ps (200 ps) pour les signaux ayant une charge inférieure ou égale à 10 p.e. (supérieure à 10 p.e.) par la collaboration HK. Cette condition étant nécessaire afin de ne pas dégrader la résolution temporelle intrinsèque des PMTs (1.1 ns pour un signal d'un p.e.). La **Figure 44** montre que la résolution temporelle d'HKROC dépasse largement ces exigences, atteignant 150 ps à 1 p.e. et étant inférieure à 30 ps pour les charges supérieures à 10 p.e.

En ce qui concerne la charge, la collaboration HK a fixé une contrainte de linéarité de 1% sur une plage allant de 1 à 1250 p.e. afin de garantir une excellente reconstruction des évènements à basse et à haute énergie. En outre, une résolution meilleure que 0.1 p.e. est requise pour les évènements

| Item measured | Performances |
|--------------------------------|---|
| Trigger efficiency at 1/6 p.e. | > 90% for 1/5 p.e signals 100% for $\geq 1/4$ p.e signals |
| Trigger noise at 1/6 p.e. | < 1 Hz (No trigger observed in 10 s) |
| TDC resolution | 150 ps at 1 p.e, 70 ps at 5 p.e, 25 ps > 10 p.e Validated with PMT |
| Charge linearity | < 0.5% in high & medium gain channels < 1% in low gain channel up to 1250 p.e Validated with PMT |
| Charge resolution | < 0.1 p.e for signals up to 10 p.e < 1% beyond 10 p.e signal Validated with PMT |
| Dead-time & pile-up | ≤ 30 ns for two signals of same amplitude ≤ 30 ns for a prompt ≤ 5 p.e and secondary of 1 p.e < 1 μ s for a prompt signal ≤ 850 p.e and secondary 1 p.e |
| Maximal hit-rate w/ 100% eff. | 415 kHz in normal mode 950 kHz in SN-mode Potential extension beyond to be studied. |
| Cross-talk | Hit probability in neighbouring channel of a 1250 p.e signal is < 0.1% Note that cross-talk found at ASIC level, but cut by FPGA. Identified and will be removed in ASIC v2. |
| Maximal hit-rate w/ 100% eff. | 415 kHz in normal mode 950 kHz in SN-mode Can be extended even beyond for v2. |
| Temperature dependency | mean time $\Delta T = 17.5$ ps/ $^{\circ}$ C rms time $\Delta T \leq 1$ ps/ $^{\circ}$ C mean charge $\Delta Q = 0.1\%$ / $^{\circ}$ C (no correction) charge variation has no dependency |
| Power consumption (W) | ≤ 6.6 W for 24 PMTs |
| Resistance to HV | Received 1,000 2000 V discharge from PMT-base Unprotected ASIC received 7×10^{10} 7V injections (> 500 yrs of HK) without any impact on performances Validated protection circuit itself saturates signals > 7 V to 7 V. |
| Failure rate / year | ASIC failure $\leq 0.03\%$ |

Figure 43 : Résumé des performances mesurées de HKROC v1.

ayant une charge inférieure à 10 p.e., afin de permettre une bonne séparation entre signal et bruit de fond. La **Figure 45** montre les mesures correspondantes pour le HKROC, qui répond parfaitement aux exigences de HK en matière de linéarité et de résolution.

Avoir un temps mort le plus faible possible est nécessaire afin de réaliser pleinement le programme de physique de HK à la fois à basse et haute énergie. Le taux d'évènement attendu lors d'une explosion d'étoile peut aller jusqu'à 1 MHz. Par ailleurs, pour les études à plus haute énergie e.g. neutrinos

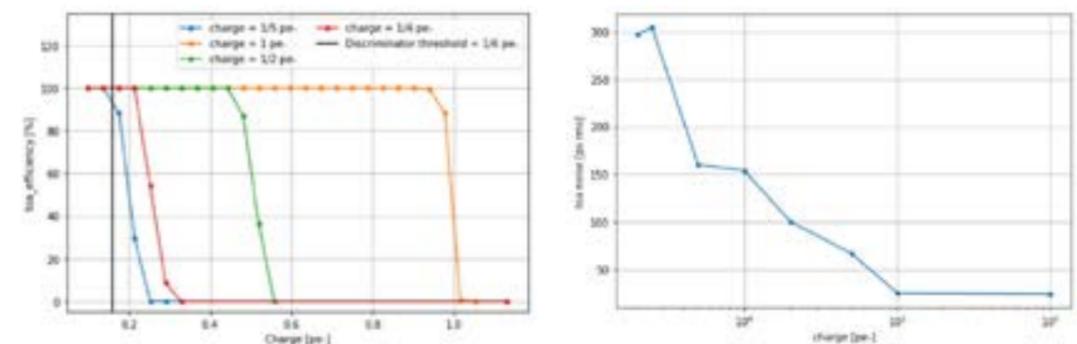


Figure 44: À gauche: mesures de l'efficacité de déclenchement du HKROC pour différents seuils et amplitudes de signal. À droite: Mesures de la résolution temporelle du HKROC.

atmosphériques et issus de faisceau, de nombreuses variables discriminantes sont basées sur le comptage (et la séparation temporelle) des électrons émis lors de la désintégration des muons. Ces variables permettent par exemple la séparation des événements neutrino et antineutrino.

La **Figure 46** montre les distributions du nombre d'électrons de désintégration dans le cas de neutrinos ou d'antineutrinos. Ces électrons de désintégration sont naturellement émis lors de la désintégration des muons avec un temps caractéristique de $2,2 \mu\text{s}$. Une fraction non négligeable des photons Čerenkov émis par ces électrons peut frapper les mêmes PMTs que ceux émis par le muon dont ils sont issus. Afin de pouvoir séparer temporellement tous ces signaux, la collaboration HK a fixé un temps mort maximal de $1 \mu\text{s}$. Cette valeur correspond à celle obtenue avec l'électronique actuelle de SK. On imagine par contre aisément pourquoi un temps mort encore plus faible aurait été préférable !

La **Figure 47** montre certaines mesures du temps mort. Sur la figure de gauche, on observe une séparation nette des deux pics à l'aide de la forme d'onde, même dans le cas de deux pics séparés de 30 ns seulement. Le temps mort dépend naturellement de la charge de l'évènement primaire et est représenté sur la figure de droite. Dans HK, que

ce soit à basse ou à haute énergie, les PMTs ne reçoivent principalement que quelques p.e., le temps mort peut donc être évalué à 30 ns dans la majorité des cas. HKROC représente donc une amélioration d'un facteur 30 par rapport aux exigences initiales, et une amélioration d'un facteur 15 par rapport aux autres solutions électroniques proposées pour HK. Il convient de noter que le temps mort pourrait même être encore réduit à 10 ns en utilisant des techniques d'analyse des formes d'onde plus innovantes. De telles méthodes ont déjà été appliquées avec succès avec HKROC.

L'impact sur la physique de ce temps mort considérablement réduit a commencé à être étudié. Pour les supernovæ de type Bételgeuse, bien que le taux d'évènement moyen soit de un neutrino par μs , la distribution de probabilité des événements est Poissonienne et donc aléatoire. Par conséquent, le faible temps mort de HKROC offre un avantage significatif par rapport aux autres solutions proposées qui ont un temps mort d'environ 500 ns . Une simple simulation présentée à la **Figure 46** montre que le numériseur HKROC a une efficacité de 92.5% alors qu'une solution avec un temps mort de 500 ns n'a qu'une efficacité de 67% . Cette amélioration importante de l'efficacité de détection des neutrinos de supernova conduit à une précision accrue sur la mesure du

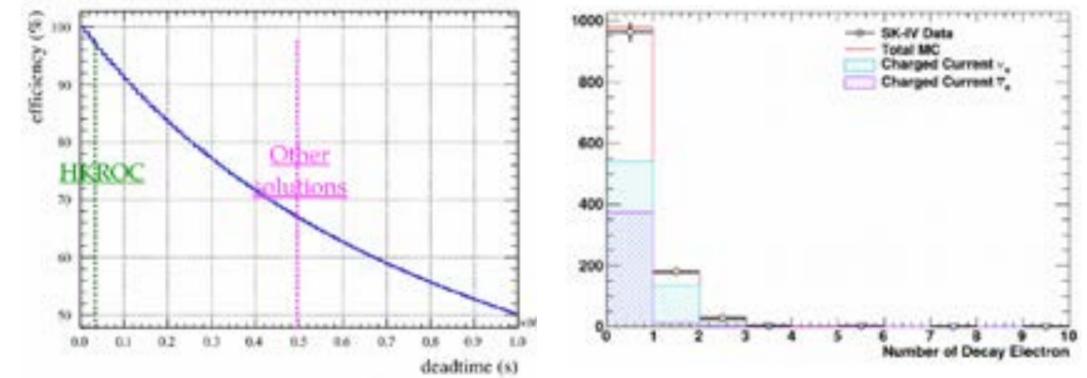


Figure 46 : Gauche : Effet du temps mort sur l'efficacité de détection des neutrinos d'une supernova telle que Bételgeuse. Dans le cas d'une supernova, la plupart des PMTs ne reçoivent pas plus d'un p.e. et le temps mort d'HKROC peut être estimé à 30 ns . À droite : Nombre d'électron de désintégrations dans les échantillons de neutrinos atmosphériques de SK.

spectre en énergie des neutrinos mesuré en fonction du temps, qui est l'observable clé pour contraindre les modèles d'explosion d'étoile. La capacité de pointage des événements astrophysiques est également fortement améliorée.

L'efficacité de détection des électrons de désintégration est limitée à 68% dans les événements atmosphériques supérieurs à 1 GeV dans SK, en raison du temps mort de $1 \mu\text{s}$ de l'électronique. Nous avons montré que HKROC permettrait

d'augmenter cette efficacité à 98% dans HK améliorant ainsi la sensibilité de l'expérience à la mesure des paramètres d'oscillation.

En plus de ces aspects, le temps mort exceptionnellement faible de HKROC permet de séparer la lumière Čerenkov directe de la lumière diffusée dans l'eau ou réfléchi sur les bords de la cuve. Cette caractéristique permet d'améliorer la connaissance de l'échelle en énergie du détecteur. L'expérience HK vise à

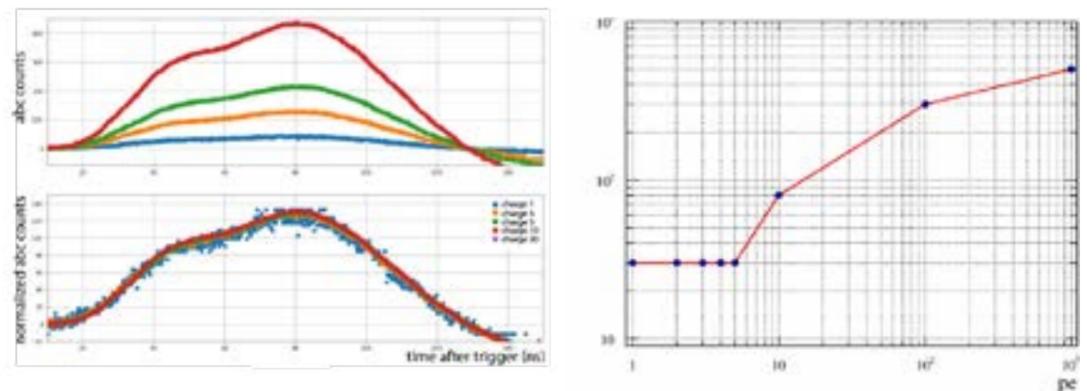


Figure 47 : Mesures de temps mort. Gauche : mesures de la forme d'onde HKROC pour deux évènements séparés par $\Delta T = 30 \text{ ns}$. Droite : Mesures du temps mort du HKROC en fonction de la charge du pic primaire. La charge du pic secondaire est prise à 1 p.e. qui est le cas le plus conservatif.

améliorer le biais systématique en énergie par rapport à SK en passant de 2.4% à 0.5% . La principale motivation de cette réduction est d'améliorer la sensibilité à la phase de violation CP (δ_{CP}), effet d'autant plus important que celle-ci est grande. La **Figure 48** montre qu'un décalage de 0.5% de l'échelle d'énergie

est équivalent à un décalage de 13° dans la mesure δ_{CP} .

Pour les événements atmosphériques d'énergie supérieure à 1 GeV , environ la moitié des PMTs reçoit à la fois un photon direct et un photon indirect juste après. Un temps mort de 500 ns entraîne une perte de 45% des photons indirects.

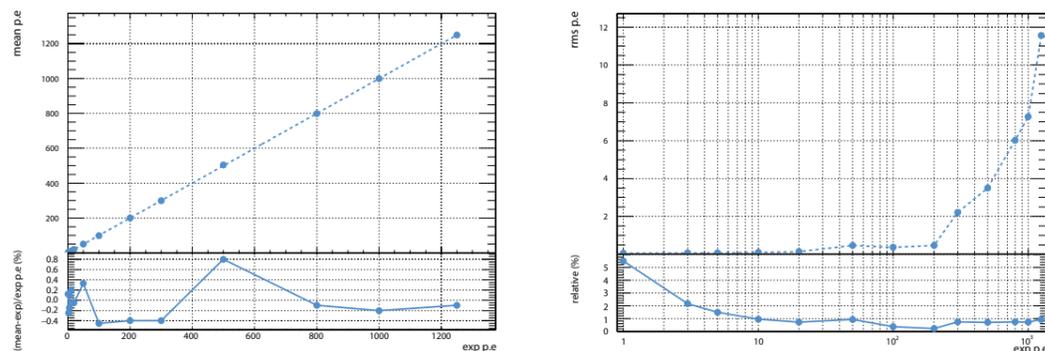


Figure 45 : À gauche : mesures de la linéarité de la charge du HKROC. À droite : Mesures de la résolution de la charge HKROC.

Pour ces PMTs touchés par plus de deux photons, la **Figure 48** montre qu'une fraction importante des photons indirects touche les PMTs plus de 30 ns après le photon direct. Quantitativement, 30 % (65 %) des photons indirects touchent un PMT après 30 ns (après 10 ns) après le photon primaire. Par conséquent, la solution HKROC permet de récupérer au moins 30 % des photons diffusés et réfléchis par rapport à une solution avec 500 ns de temps mort. L'utilisation de techniques d'analyse des formes d'onde plus innovantes permettra même de récupérer 65 % de ces photons perdus.

Le dernier point concerne la durabilité de la solution HKROC. Contrairement à SK, l'électronique d'HK sera placée sous l'eau dans un conteneur étanche,

sans possibilité de maintenance aisée. Par conséquent, les contraintes relatives à la durabilité du numériseur et à son comportement par rapport à la température et à l'humidité sont d'une importance capitale. La collaboration a fixé un taux de défaillance maximal et ambitieux inférieur à 1 % en dix ans. Nous avons fait appel à une société externe *Hensoldt Space Computing* afin de nous fournir une estimation du taux de défaillance de l'ASIC. Compte tenu des conditions de température et d'humidité du container étanche, un taux de défaillance inférieur à 0.3 % en 10 ans a été estimé.

En résumé, toutes les performances du HKROC satisfont aux exigences de

afin de produire un numériseur de PMT universel qui pourrait être utilisé dans d'autres expériences ou dans la future mise à niveau de l'électronique d'HK. Cette proposition a été fortement soutenue non seulement au LLR, mais aussi à OMEGA et dans les laboratoires du DPhP-CEA. Depuis cette décision, l'équipe HKROC a présenté les résultats de l'expérience HKROC lors des conférences internationales suivantes :

- *HKROC: an integrated front-end ASIC to readout photomultiplier tubes for the Hyper-Kamiokande experiment*, Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP), S. Conforti, septembre 2022, Bergen (Norvège)
- *HKROC: an integrated front-end ASIC to readout photomultiplier tubes for large neutrino experiments*, International Conference on the Physics of the 2 infinities, F. Dulucq, mars 2023, Kyoto (Japon)
- *HKROC: a modern integrated front-end ASIC to readout photomultiplier tubes for Čerenkov-based experiments*, Technology Instrumentation in Particle Physics (TIPP), R. Rogly, septembre 2023, Le Cap (Afrique du Sud)

Par ailleurs, le projet a donné lieu à une publication d'actes pour la conférence TWEPP2022, tandis qu'une seconde est en préparation pour la conférence TIPP2023 :

- *HKROC: an integrated front-end ASIC to readout photomultiplier tubes for the Hyper-Kamiokande experiment*, S. Conforti Di Lorenzo et al 2023 JINST 18 C01035.

Deux articles sont actuellement en cours de rédaction : un axé sur les performances de l'ASIC et de la carte de test et un autre portant sur la conception du numériseur universel.

Le numériseur fait également partie du projet DRD2 du CERN, où il a été présenté récemment.

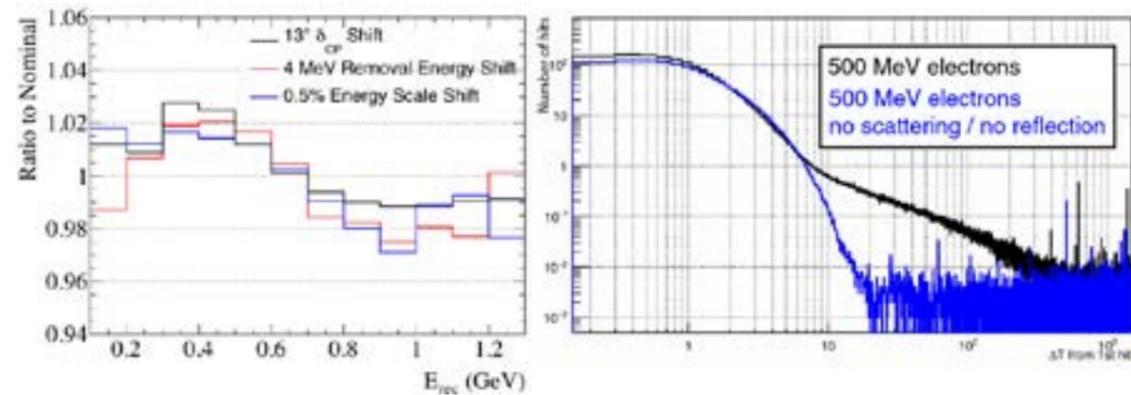


Figure 48 : À gauche : Effet relatif sur le spectre des neutrinos d'un décalage de 13° de δ_p (en noir) et d'un décalage de 0.5 % de l'échelle en énergie de HK (bleu). À droite : Différence de temps obtenue par simulation entre les photons frappant un même PMT dans HK pour un échantillon de neutrinos atmosphériques. La courbe bleue montre le cas de la lumière Čerenkov directe uniquement, tandis que la courbe noire prend en compte à la fois la lumière Čerenkov directe et la lumière indirecte diffusée et réfléchie.

l'expérience HK et les dépassent même en ce qui concerne la résolution temporelle, le temps mort, la consommation d'énergie et la durée de vie.

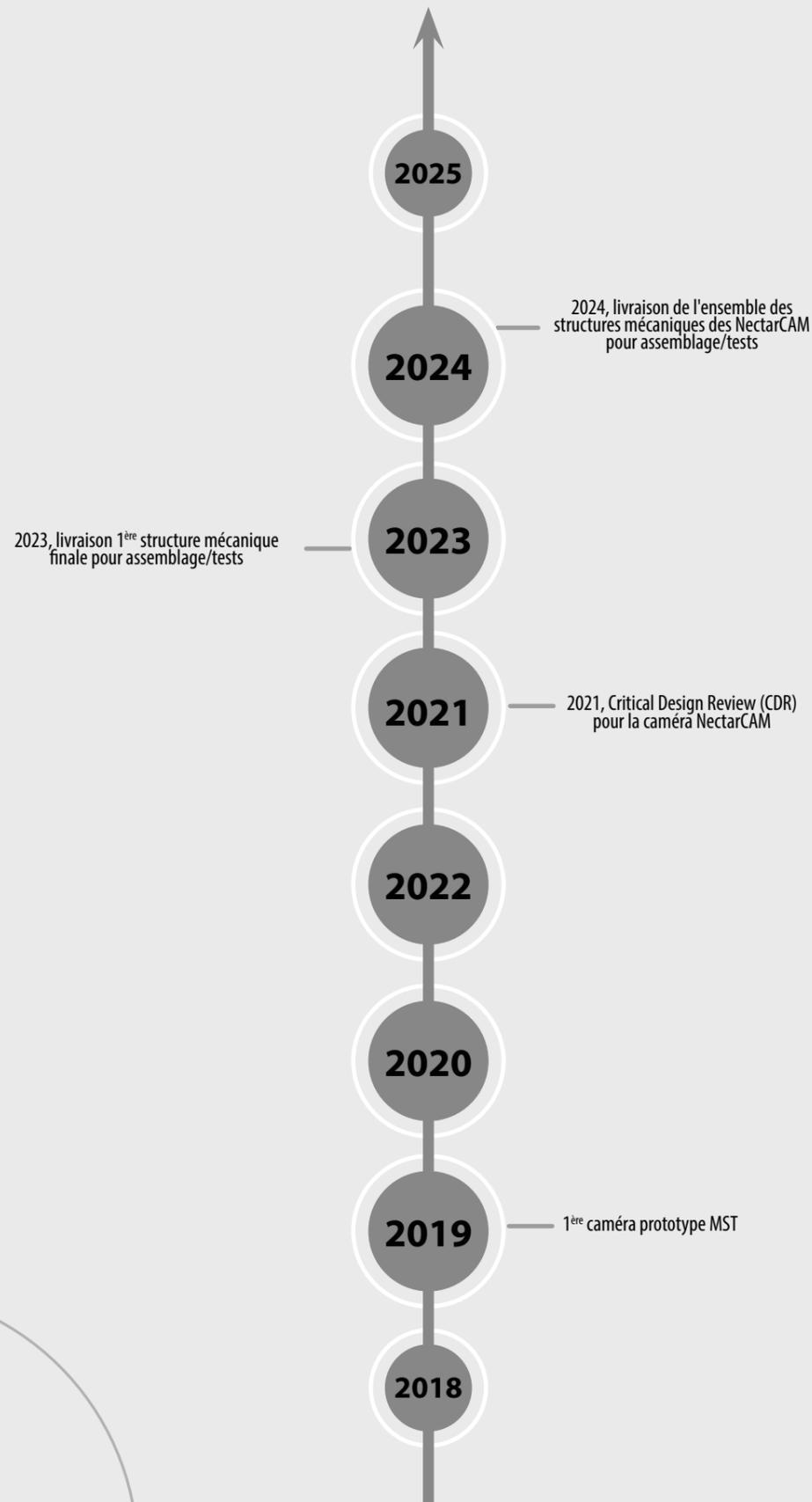
3.3.6.4 Prochains objectifs et perspectives

Le numériseur HKROC n'a pas été choisi comme option principale par la collaboration HK, et ce malgré le fait que d'importants avantages physiques aient été reconnus. Selon la direction de l'expérience, le calendrier et la faisabilité

du numériseur HKROC correspondaient parfaitement au cahier des charges, mais les solutions alternatives, appuyées par des décennies de prototypes, étaient plus avancées dans leur développement. Elle a ainsi décidé d'opter pour une solution plus conventionnelle plutôt que pour une conception innovante.

Malgré cette décision, le développement du numériseur s'est poursuivi et a mûri

CTA : DATES CLEFS



3. 4 Astroparticules

3.4.1 Contexte et objectifs

L'étude des rayons cosmiques de haute énergie est intimement liée à l'histoire du laboratoire, et ce depuis les travaux pionniers de Louis Leprince-Ringuet dans la première moitié du 20^e siècle. Il s'agissait initialement de comprendre la nature de ces faisceaux naturels pour la recherche et la découverte de nouvelles particules. Puis, tandis que les grands accélérateurs prenaient le relais dans ce domaine avec, entre autres, le développement du laboratoire européen du CERN, l'intérêt s'est porté vers la compréhension de l'origine même de ces rayons cosmiques de haute énergie. Le LLR a contribué à l'émergence d'un nouveau programme d'astronomie γ au sol dans les années 1990 avec l'imageur Čerenkov CAT et l'échantillonneur CELESTE installés sur le site d'une ancienne centrale solaire à Thémis dans les Pyrénées.

L'astronomie γ est l'étude du ciel au-delà du MeV. Il s'agit de rechercher et d'inventorier les objets émettant des rayons gamma et de comprendre les mécanismes d'émission au cœur de ces objets. Les sources gamma font intervenir des objets compacts (étoiles à neutron, trous noirs) et/ou des chocs (restes de supernovæ, jets des noyaux actifs de galaxie). Les processus d'émission des rayons gamma au sein de ces sources sont fortement énergétiques et l'astronomie γ est souvent vue comme l'étude des phénomènes violents dans l'univers. Le rayonnement de ces sources ne se limite pas aux rayons gamma mais couvre l'ensemble du spectre électromagnétique. Leur compréhension nécessite donc une approche multi-longueurs d'onde, depuis les ondes radio jusqu'au TeV. Il est à noter qu'une grande partie des sources gamma sont très variables et que leur étude nécessite une surveillance continue de leur niveau d'activité et la participation aux réseaux mondiaux d'alerte.

Le LLR contribue à l'astronomie γ au travers de la conception et réalisation d'instruments, d'outils d'analyse et dans l'exploitation/interprétation des mesures. Le programme d'astronomie γ s'est considérablement développé à partir des années 2000 au LLR. Aujourd'hui, l'activité du groupe d'astronomie γ est structurée par thématiques (polarimétrie, multi-longueurs d'onde, nature de l'objet céleste, événements transitoires) mais aussi par expériences. Cette activité diversifiée couvre un large spectre et se décline en *projets* impliquant plusieurs membres du groupe au sein de telle ou telle expérience, et d'autres plus individuels et souvent en collaboration avec des collègues extérieurs au laboratoire.

Dans le domaine de l'astronomie γ de haute énergie, le LLR a contribué à la construction du Large Area Telescope (LAT) du satellite Fermi lancé en 2008. Le LAT, qui réalise une image du ciel entier toutes les 3 heures, continue de fournir des données essentielles dans la gamme d'énergie pour les γ de 20 MeV à 300 GeV. Le laboratoire était chargé de la mécanique du calorimètre, l'un des trois sous-systèmes de l'instrument. Moins d'un an après son lancement, l'expérience Fermi avait déjà découvert plus d'une douzaine de nouveaux pulsars, (noyaux résiduels d'une étoile massive après l'explosion de sa supernova) émettant uniquement dans le domaine des rayons gamma. Initialement prévue pour 10 ans, la mission du satellite a été prolongée à plusieurs reprises par le Senior Review Committee de la NASA et les détecteurs sont toujours en fonctionnement aujourd'hui.

Au-dessus de la gamme d'énergie de Fermi-LAT, le flux des sources de rayons γ les plus intenses devient si faible qu'il faut des instruments de très grande surface effective ($>10^5 \text{ m}^2$), qui ne peuvent être construits qu'au sol et reposent sur le développement de gerbes atmosphériques. Le LLR a contribué à la conception et à la fabrication de

la mécanique des caméras des quatre télescopes de 13 m de diamètre ainsi que la caméra du grand télescope de 28m de diamètre du réseau de télescopes atmosphériques imageurs H.E.S.S. installé en Namibie en septembre 2012. H.E.S.S. étudie les rayons gamma cosmiques dans la gamme d'énergie allant de 100 GeV à environ 100 TeV. Le bestiaire des événements violents transitoires dans l'Univers s'est considérablement élargi depuis plus d'une décennie grâce à Fermi-LAT et H.E.S.S..

Le projet de Čerenkov Telescope Array (CTA) est un instrument majeur de la prochaine génération d'expériences d'astronomie γ au sol. L'objectif est d'une part d'améliorer la sensibilité d'un facteur 5 à 10 aux plus hautes énergies, dans la

gamme de 100 GeV à 10 TeV, et d'autre part d'étendre la fenêtre des énergies observables vers les plus basses et les plus hautes énergies. Il s'agit d'élaborer des cartographies plus complètes et de permettre des études de variabilité à des échelles de temps plus rapides. L'observatoire comportera un réseau d'une centaine de télescopes à imagerie Čerenkov atmosphériques partagés entre deux sites: un site dans l'hémisphère nord à La Palma dans les îles Canaries pour l'étude des objets extragalactiques, et un dans l'hémisphère sud dans le désert d'Atacama au Chili focalisé sur les sources galactiques. Le LLR est impliqué depuis une dizaine d'années dans les développements techniques pour le projet avec la conception et la réalisation

Les effectifs

Les **groupes d'astroparticules** (Fermi-LAT dirigé par Philippe Bruel, H.E.S.S. dirigé par Mathieu de Naurois et CTA dirigé par Stephen Fegan) comprenaient 5 permanents et 5 doctorants ou post-doctorants au 31 décembre 2023 :

- **Permanents** : Denis **Bernard**, Philippe **Bruel**, Mathieu **de Naurois**, Stephen **Fegan** et Deirdre **Horan**.
- **Post-doctorants** : Halim Ashkar et Adrien Laviron.
- **Doctorants** : Julie de Assis Scarpin, Samantha Lopez Perez et Wassim Si Said.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Rémi Adam (CRCN), Gérard Fontaine (DR Émérite), Sami Caroff⁽²⁾, Cyril Trichard⁽²⁾, Jacques Muller⁽¹⁾, Janeth Valverde⁽¹⁾

⁽¹⁾Ph.D. ⁽²⁾post-doc

des caméras "NectarCAM" destinées aux télescopes dits de taille moyenne (MST) de CTA.

Durant la période récente, le groupe d'astronomie γ du LLR a poursuivi sa participation à deux expériences en fonctionnement (Fermi-LAT et H.E.S.S.) ainsi qu'au projet CTA, et a mené un travail sur la polarimétrie gamma (incluant l'expérience HARPO). Avec le télescope spatial Fermi-LAT et le réseau de télescopes Čerenkov au sol H.E.S.S., et

bientôt CTA, les activités du groupe du LLR couvrent un domaine en énergie de ~ 20 MeV à plusieurs dizaines de TeV et permettent d'avoir une vision complète de l'astronomie γ .

3.4.2 Astronomie γ avec le satellite FERMI

Introduction

Le satellite Fermi, lancé en 2008, comprend deux instruments : le *Gamma-ray Burst Monitor* (GBM) couvrant la

gamme d'énergie d'environ 10 KeV à 30 MeV et le *Large Area Telescope* (LAT) pour la gamme d'environ 20 MeV à 300 GeV. Le groupe Fermi du LLR est impliqué dans le LAT depuis le début des années 2000. La structure mécanique du calorimètre a été conçue et fabriquée au LLR.

Initialement prévue pour 10 ans, la mission Fermi a été prolongée plusieurs fois par la NASA lors des *Senior reviews* qui ont lieu tous les trois ans. En attendant le démarrage de CTA, la NASA envisage de prolonger la mission pour plusieurs années et des essais sont actuellement en cours pour remonter le satellite à son altitude initiale.

Fermi-LAT a permis d'augmenter fortement notre connaissance des sources de rayonnement gamma : la mission précédente, EGRET, en avait détecté environ 280 alors que le dernier catalogue de Fermi utilisant 14 ans de données en contient plus de 7000. Le LAT a ainsi permis un saut spectaculaire de nos connaissances pour l'ensemble des types de sources émettant des rayons gamma entre 20 MeV et plus de 300 GeV : les sources galactiques (pulsars, restes de supernovæ, vents de pulsar, etc.) et extragalactiques (noyaux actifs de galaxies, sursauts gamma, etc.) ainsi que l'émission diffuse de la galaxie.

La **figure 49** montre le ciel gamma tel que vu par Fermi-LAT. Les processus d'émission des rayons gamma au sein de ces sources sont fortement énergétiques et l'astronomie γ est souvent vue comme l'étude des phénomènes violents dans l'univers.

La compréhension des processus d'émission nécessite la plupart du temps une couverture de l'ensemble du spectre électromagnétique des sources concernées, de la radio au TeV. Fermi s'est donc tout naturellement inséré dans l'astronomie multi-longueurs d'onde. Depuis 2017, Fermi joue un rôle central dans l'astronomie multi-messagers qui a pris son essor avec la détection de la contrepartie gamma de l'onde gravitationnelle GW 170817, ainsi que la détection de l'activité gamma du blazar TXS 0506+056 coïncidant avec un neutrino vu par IceCube.

Science ouverte, optimisation de l'instrument et préparation des données

Une des spécificités de Fermi est que les données sont rendues publiques, et ce depuis 2009, c'est-à-dire un an après le lancement. Ainsi, les données reconstruites de Fermi-LAT représentant $\sim 1,5$ milliard de photons gamma après 15 ans de prises de données sont automatiquement mises à disposition

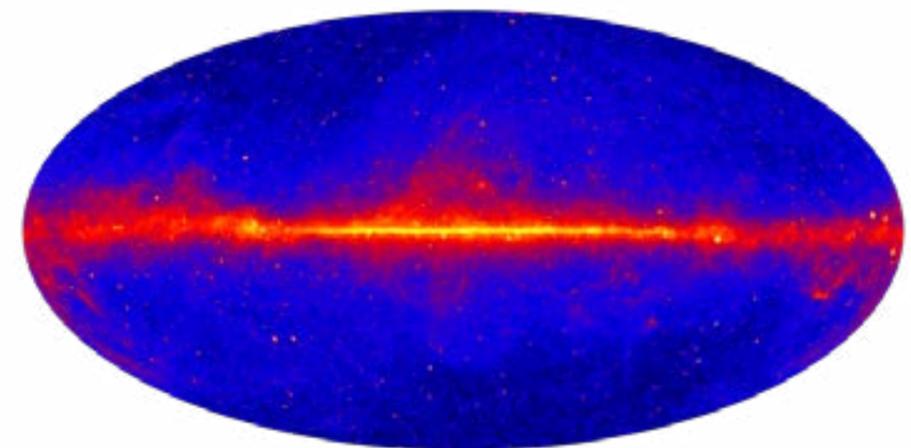


Figure 49 : Ciel gamma tel que vu par Fermi-LAT (les points correspondent aux sources gamma ; l'émission diffuse est due à la collision des rayons cosmiques sur le gaz de notre galaxie).

de la communauté internationale. C'est un exemple d'*Open Data* systématique qui n'est pas courant pour un laboratoire de l'IN2P3. La collaboration Fermi-LAT a pour mission de produire les données et de mettre au point les outils d'analyse, ainsi que les informations nécessaires à l'analyse des données (comme les fonctions de réponse de l'instrument).

Le groupe du LLR a contribué très activement, avant et après le lancement, au développement de la reconstruction des photons et de la sélection des événements. Il a en particulier fait partie de l'équipe qui, à partir de 2010, a effectué une refonte complète de cette reconstruction et de cette sélection. La nouvelle version des données, appelée *Pass 8*, a été rendue publique en 2015. Le seul problème avec ces données était la présence d'un bruit de fond résiduel anisotrope de rayons cosmiques chargés. Des membres du LLR ont compris l'origine de cette contamination et ont mis au point une sélection qui la réduit quasiment totalement. La version actuelle des données de Fermi a bénéficié d'une amélioration de la sélection entièrement développée au LLR. C'est cette sélection qui a été utilisée pour *reprocesser* les données du LAT, qui ont été rendues publiques¹ en 2018.

Les fonctions de réponse de l'instrument (IRFs) ont été déterminées à partir de simulations. En comparant les données avec les prédictions utilisant ces IRFs, nous avons détecté un écart relatif de la surface effective. À partir de ces comparaisons, le groupe a mis au point une nouvelle version des IRFs. La version actuelle des fonctions de réponse de l'instrument, rendue publique en septembre 2020, correspond à cette correction mise au point au LLR. Le groupe participe par ailleurs au travail de vérification de la qualité des données sous la forme de quelques semaines par an pendant lesquelles il vérifie et valide

¹ Bruel Ph., Burnett J.H., Digel S.W., Johannesson G., Omodei N., Wood M., Fermi-LAT improved Pass-8 event selection (2018) Available at <http://arxiv.org/abs/1810.11394>.

les données au fur et à mesure qu'elles sont produites.

En plus des données correspondant aux photons gamma collectés, nous rendons publiques les informations de pointé du satellite (position et orientation en fonction du temps : fichiers FT2). Il a été décidé en 2020 d'ajouter aux fichiers FT2 la vitesse du satellite. C'est lors du changement de version du *processing* des données que nous nous sommes aperçus qu'une erreur dans le code dégradait significativement l'information de l'orientation pour une faible, mais non nulle, fraction des données (uniquement celles prises après 2015). Nous avons montré que l'impact de cette erreur sur la direction des photons mesurés était négligeable (erreur $>0.1^\circ$ pour une fraction des événements inférieure à 3e-7) et corrigé le code avant de produire les nouveaux fichiers FT2, rendus publics en avril 2021.

En résumé, le LLR a eu un rôle majeur dans la mise au point de la dernière version de la reconstruction des données (*Pass 8*), de la dernière version de la sélection et des IRFs (P8R3), ainsi que de la dernière version des informations de pointé du satellite.

Catalogue général de sources

Un des livrables dont la collaboration LAT est responsable est le catalogue général de sources. Ce catalogue contient toutes les sources gamma détectées par Fermi, avec leurs positions mais aussi d'autres informations (spectre, variabilité, association avec des sources connues à d'autres longueurs d'onde). Le quatrième catalogue général de Fermi (4FGL) a été mis au point à partir de 8 ans de données et publié en 2019. Depuis, la collaboration produit des versions incrémentales avec, à chaque fois, deux années de données supplémentaires : 4FGL-DR2 (10 ans) en 2020, 4FGL-DR3 (12 ans) en 2022 et enfin 4FGL-DR4 (14 ans) publié [1] en juillet 2023.

Le groupe Fermi-LAT du LLR est de plus en plus impliqué dans l'élaboration de ce catalogue, en particulier dans sa vérification reposant sur un outil qu'il a mis au point. Le principe général est que pour une région du ciel donnée, la carte 3D (position+énergie) de photons prédits par l'ensemble des sources du catalogue doit être compatible avec la carte observée. La méthode standard pour vérifier l'accord entre ces cartes est de calculer le TS pour chaque pixel. Cette méthode a au moins deux défauts : elle

n'est pas sensible aux résidus négatifs et elle demande beaucoup de temps CPU. Le groupe a développé une méthode plus rapide et capable de détecter des excès comme des déficits [2], ce qui a permis de procéder à la vérification des deux dernières versions du catalogue 4FGL (12 et 14 ans). Vu le nombre très important de sources que détecte Fermi, cette vérification systématique est devenue indispensable. Elle a permis de mettre en évidence des déficits légèrement étendus dus à un problème de modélisation de

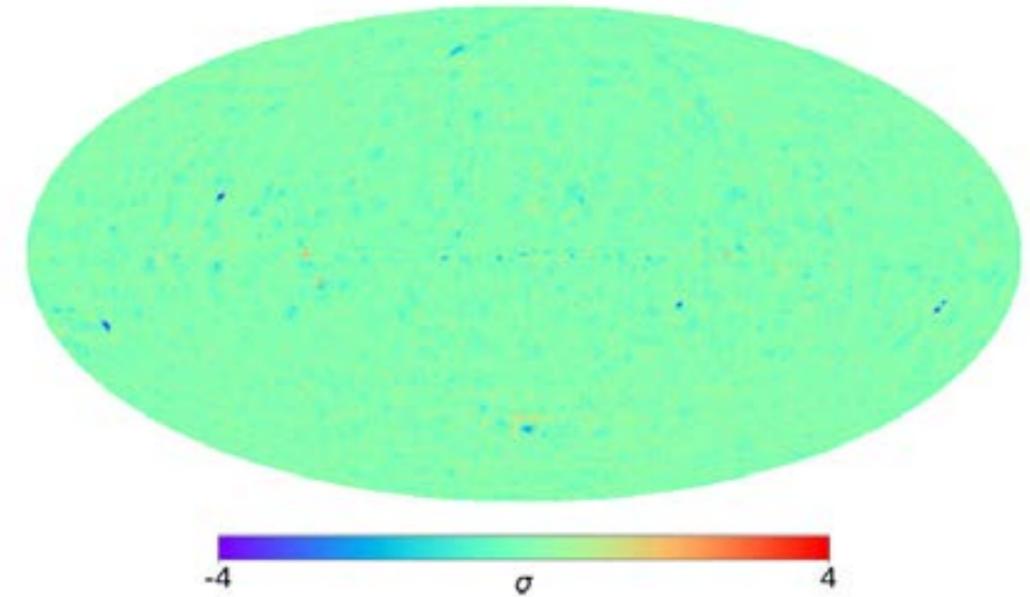


Figure 50 : Carte du ciel entier pour l'estimateur d'accord données/modèle de Fermi.

l'émission diffuse galactique (Figure 50).

Une très grande fraction des sources gamma est variable, en particulier les noyaux actifs de galaxie. Ces sources peuvent rester dans un état bas (et donc non détectables) pendant de nombreuses années et puis rentrer en activité pendant quelques jours, semaines, mois ou années. Quand la période d'activité est courte, il est très probable que la source gamma ne sera pas détectée par l'analyse catalogue qui intègre les données sur plusieurs années. Afin d'augmenter notre efficacité à détecter ce type de sources, nous avons mis au point une nouvelle méthode pour chercher de nouvelles sources sur des intervalles d'un mois.

Elle consiste à travailler sur 540 régions du ciel de 12×12 degrés, mesurer les courbes de lumière de toutes les sources gamma variables connues, calculer les cartes de photons attendues par le catalogue et comparer avec les cartes mesurées, et ce pour tous les intervalles de temps considérés. Cela permet de détecter des déviations que l'on analyse individuellement pour confirmer l'existence d'une nouvelle source gamma. Les résultats préliminaires montrent qu'avec des intervalles d'un mois sur 15 ans de données, nous détectons plus de 100 sources gamma supplémentaires.

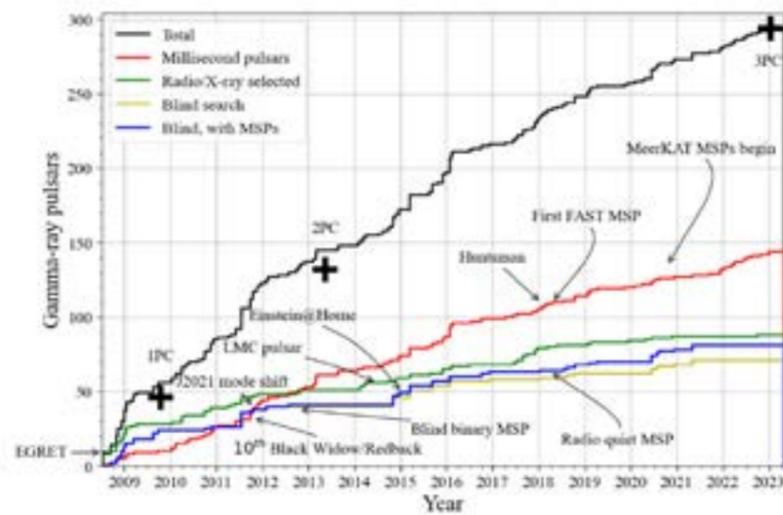


Figure 51 : Nombre de pulsars détectés par Fermi-LAT en fonction du temps. Réf : D. A. Smith et al 2023 ApJ 958 191 (The Third Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars)

Recherche et caractérisation des pulsars

Le groupe Fermi-LAT participe également à la recherche et la caractérisation des pulsars gamma. Les pulsars sont des étoiles à neutron en rotation avec un fort champ magnétique. La recherche d'émission gamma de ces pulsars est un thème de recherche important au sein de la collaboration Fermi-LAT. Une stratégie de recherche de pulsars gamma est d'utiliser les éphémérides de pulsars radio connus afin de chercher un signal gamma pulsé. Afin d'optimiser cette recherche, nous pondérons les photons par leur probabilité d'avoir été émis par le pulsar. Cette pondération est possible si la source gamma est suffisamment brillante mais ce n'est pas le cas pour des sources moins brillantes. Afin de pallier cette limitation, nous avons développé un outil de recherche de signal périodique pour des sources gamma très faibles² et cette méthode a été appliquée à un millier de pulsars radio³. Cette méthode de

pondération est aussi utilisable pour les pulsars brillants et elle a donc été utilisée dans l'élaboration du troisième catalogue de pulsars gamma de Fermi⁴ rendu public en juillet 2023 et auquel le groupe a contribué. Ce catalogue contient ~300 pulsars, alors que moins de 10 étaient connus avant le lancement de Fermi (Figure 51).

Une observation surprenante est qu'environ la moitié de ces pulsars sont des pulsars milliseconde. Cette découverte a été en grande partie possible grâce au catalogue général de sources de Fermi. En effet, parmi les sources non associées, certaines ont un spectre courbé et piquant vers ~1 GeV, comme les pulsars. Un programme de recherche de pulsars radio dans la direction de ces sources a ainsi été mené et il a permis de trouver de nouveaux pulsars radio, ce qui a permis en retour de détecter un signal pulsé en gamma. Il est à noter que certains de ces pulsars milliseconde sont des sources très stables

² Bruel Ph., Extending the event-weighted pulsation search to very faint gamma-ray sources, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 2019; 622: A108.

³ Smith D.A., Bruel Ph., Cognard I., Cameron A.D., Camilo F., Dai S., et al., Searching a Thousand Radio Pulsars for Gamma-ray Emission, *The Astrophysical Journal* (2019) 871:78 (13pp.).

⁴ Smith D.A., Bruel Ph., Clark C.J., Guillemot L., Kerr M.T., Ray P., et al. The Third Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars (2023) doi:10.3847/1538-4357/acee67.

et qu'ils sont utilisés dans le cadre des *pulsars timing arrays*, qui ont récemment mis en évidence le bruit de fond d'ondes gravitationnelles à basse fréquence⁵. De plus, il a été démontré que le signal gamma de ces pulsars peut apporter une information complémentaire concernant ce bruit de fond⁶.

Analyse de l'émission prompt de GRB 221009a

En octobre 2022, Fermi, ainsi que d'autres télescopes, a détecté le sursaut gamma GRB 221009a qui est à ce jour le sursaut gamma le plus brillant jamais détecté. Sa luminosité exceptionnelle s'explique en partie par sa proximité (~2 milliards d'années-lumière). Il était tellement brillant que l'émission en dessous de 20 MeV a produit un bruit additionnel dans le LAT empêchant d'utiliser les données publiques ainsi que les outils standard d'analyse pendant la soixantaine de secondes qu'a duré l'émission la plus

brillante du sursaut. L'énergie factice due au bruit dans le trajectographe et le calorimètre atteint plus de 100 MeV et le bruit dans le détecteur d'anti-coïncidence a entraîné une chute de l'efficacité de détection.

Notre expertise dans la reconstruction et la sélection des données acquise depuis le début de Fermi-LAT nous a permis de développer une analyse de la partie la plus brillante de l'émission prompt de ce sursaut gamma. Cette analyse s'appuie d'une part sur la capacité d'utiliser l'émission due à l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère pour estimer la perte d'efficacité dans le détecteur d'anti-coïncidence et d'autre part sur une simulation multi-photons du bruit de fond dû à l'émission du sursaut en dessous de 20 MeV. Il est à noter que pour la partie la plus brillante du sursaut, le flux du sursaut à basse énergie n'était pas connu et qu'il a fallu l'estimer à partir des données du LAT. Nous avons ainsi pu mesurer la courbe de lumière de l'émission prompt de ce sursaut ainsi que son spectre (article en préparation). Contrairement à l'émission en dessous de

⁵ Agazie G, Anumarlapudi A, Archibald AM, Arzoumanian Z, Baker PT, Bécsy B, et al., The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background, *Astrophysical Journal Letters* (2023) 951:L8.

⁶ The Fermi-LAT Collaboration, A gamma-ray pulsar timing array constrains the nanohertz gravitational wave background, *Science* (2022) Vol 376, Issue 6592 pp. 521-523.

Une décennie d'observation multi-longueurs d'onde d'un blazar au TeV (publication Fermi-LAT)

Fermi-LAT Collaboration, A Decade of Multiwavelength Observations of the TeV Blazar 1ES 1215+303: Extreme Shift of the Synchrotron Peak Frequency and Long-term Optical–Gamma-Ray Flux Increase, *Astrophysical Journal* Vol. 891 n° 2 (2020) 170.

Depuis le début de la mission Fermi-LAT, le groupe astronomie gamma du LLR a été très impliqué dans l'étude des noyaux actifs de galaxies (AGNs). L'objet central des AGNs est un trou noir massif ($10^6 M_{\text{Soleil}}$) entouré par un disque d'accrétion avec des jets le long desquels des particules sont accélérées jusqu'au TeV. Les propriétés observables d'un AGN dépendent de l'angle de visée : si l'un des jets pointe vers nous, il s'agit de blazars, sinon il s'agit de galaxies radio. La plupart des objets détectés en gamma sont des blazars. Ils constituent des laboratoires naturels pour l'étude de l'accélération des particules chargées, les processus à l'œuvre dans les plasmas

relativistes, la dynamique des champs magnétiques et la physique des trous noirs. Ils sont aussi considérés comme des candidats pour l'émission des neutrinos de très haute énergie. De par les mécanismes d'émission en jeu, le spectre des blazars s'étend sur tout le spectre électromagnétique. Pour modéliser leur émission, il est donc indispensable d'avoir des observations multi-longueurs d'onde, allant de la radio jusqu'aux très hautes énergies. De plus, les blazars sont des sources extrêmement variables. Cela entraîne que leur compréhension nécessite des données simultanées et qu'il est souhaitable d'avoir une couverture temporelle la plus longue possible. Contrairement au Fermi-LAT qui a un grand champ de vue, la plupart des instruments ont des champs de vue relativement petits et il faut les pointer vers les sources que l'on veut étudier. Il s'ensuit que la mise en place de campagnes observationnelles simultanées nécessite un très gros effort organisationnel.

En collaboration avec nos collègues de Columbia University, le groupe Fermi-LAT du LLR a mené une étude détaillée du blazar 1ES 1215+303. Cette source, dont le redshift est de 0.13, a été détectée en 2012 au-delà de 300 GeV et a connu en 2014 l'une des éruptions les plus lumineuses jamais vues à ces énergies. Afin d'obtenir une compréhension plus détaillée de son émission, nous avons coordonné une campagne d'observation de cet objet, impliquant près de 90 astronomes du monde entier et de nombreux instruments : radio (OVRO, Metsähovi, VLBA et MOJAVE/VLBA), optique (Tuorla et NOT), UV (Swift-UVOT), rayons X (Swift-XRT) et rayons gamma (Fermi-LAT et VERITAS) (Figure 52).

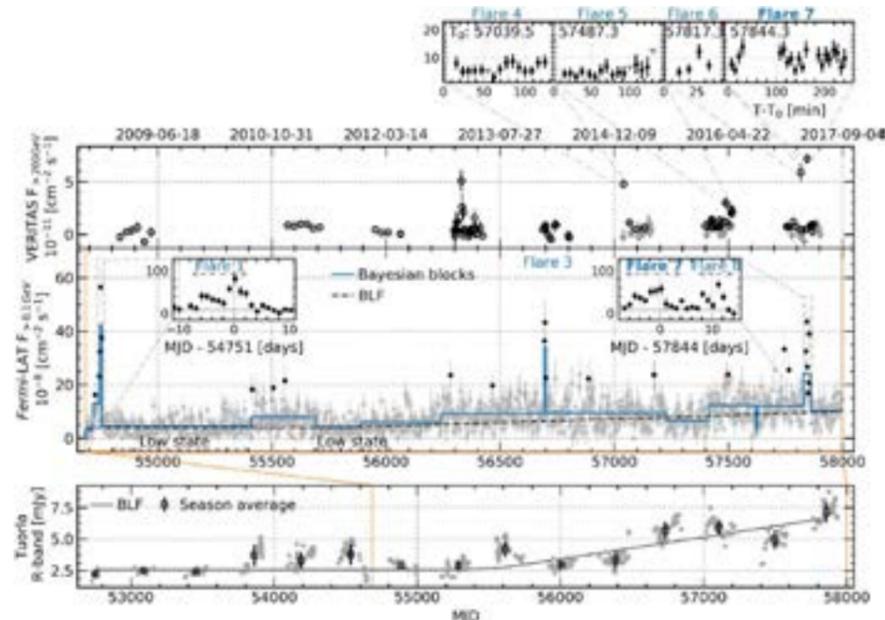


Figure 52 : Courbes de lumière du blazar 1ES 1215+303. En haut : données VERITAS au-dessus de 200 GeV, avec un zoom détaillé sur les éruptions jusqu'aux échelles de temps inférieures à l'heure. Au milieu : données Fermi-LAT avec zoom quotidien sur les Flares 1, 7 et 8. En bas : données Tuorla (optique).

Les résultats de cette étude nous ont permis notamment de mettre en évidence un changement extrême de l'énergie du pic de l'émission synchrotron de l'infrarouge

vers les rayons X mous, lors de l'éruption, ce qui remet en question de nombreux schémas de classification établis de longue date pour les AGN. Ce résultat a été obtenu grâce à la couverture multi-longueurs d'onde qui comprenait des observations pendant de nombreux états d'émission différents de la source plutôt que de se concentrer uniquement sur les états de "flaring" comme cela se faisait souvent dans le passé. Nous avons montré que l'émission pouvait être modélisée par des processus leptoniques sans nécessiter de composante hadronique. Nous avons également découvert, pour la première fois, une tendance à l'augmentation à long terme du flux aux longueurs d'onde des rayons gamma et optiques.



Figure 53 : Expérience H.E.S.S., avec son réseau de 5 télescopes Čerenkov, installée sur un plateau à 1800 m au-dessus de la mer dans la région du Khomas en Namibie.

20 MeV qui a deux pics d'intensité séparés de ~20 s, l'émission au-dessus de 20 MeV a un seul pic (arrivé entre les deux pics basse énergie) et elle est concomitante avec l'émission vue à quelques TeV⁷.

3.4.3 Astronomie γ avec l'expérience H.E.S.S.

Introduction

L'expérience H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) est un réseau de télescopes imageurs à effet Čerenkov atmosphérique, installé en Namibie depuis 2003 (Figure 53), et qui a révolutionné notre vision du ciel gamma aux énergies les plus élevées. Le groupe

⁷ The LHAASO Collaboration. Very high-energy gamma-ray emission beyond 10TeV from GRB 221009A, *Science Advances* (2023) Vol 9, Issue 46, doi:10.1126/sciadv.adj2778.

du LLR a participé à la conception et à la réalisation des structures mécaniques des caméras, au système d'acquisition, ainsi qu'aux prises de données, au calibrage, analyse et interprétation de ces dernières.

Depuis son inauguration, l'expérience H.E.S.S. observe le ciel dans la fenêtre de plus haute énergie du spectre électromagnétique, dans le domaine dit "des rayons gamma de très haute énergie", de quelques dizaines de GeV à environ la centaine de TeV. Alors qu'on ne connaissait qu'une poignée d'objets astrophysiques émettant dans ce domaine au démarrage de H.E.S.S., le catalogue de sources comporte maintenant plus de 200 objets, de types très variés : restes de supernovæ, pulsars et nébuleuses à vents de pulsars,

systèmes binaires et novæ, microquasars, vents d'étoiles massives en interaction, noyaux actifs de galaxies, galaxies à flambée d'étoile et sursauts gamma, et pour finir amas de galaxies.

Le groupe du LLR a participé à de nombreux projets scientifiques exploitant les données de H.E.S.S., notamment la première mise en évidence de l'émission étendue associée aux jets d'une radio-galaxie proche, Centaurus A, l'étude de la variabilité temporelle de divers systèmes binaires dont LS 5039 et PSR B1859-63, la première mise en évidence d'une émission diffuse dans le grand nuage de Magellan, ou l'étude du magnétar SGR 1806-20. Le groupe du LLR a également développé de nombreuses méthodes novatrices, dont un paradigme de simulation réaliste de chaque observation individuelle permettant l'obtention de fonctions de réponse plus précises qu'avec les méthodes usuelles, des outils de recherche de sources transitoires, ou une méthode d'intercalibration utilisant un drone émettant des flashes de lumière au-dessus du réseau de télescopes.

Instrumentation

Après son implication dans la construction des caméras, dans les logiciels de contrôle des caméras et d'acquisition de données, le groupe du LLR est maintenant responsable du développement et de la maintenance de l'une des deux suites logicielles de simulation, calibrage, reconstruction et analyse de données utilisée dans la collaboration H.E.S.S. pour produire des publications scientifiques. Cette responsabilité très importante recouvre de nombreux aspects :

Transfert automatisé des données prises par les télescopes en Namibie

Archivage au Centre de calcul de Lyon (d'un volume d'environ 6 pétaoctets)

Gestion de bases de données sur l'instrument, les données acquises, les simulations disponibles, la production de fonctions de réponses, etc. Calibrage et

reconstruction des données

Production des simulations de cascades atmosphériques et de la simulation du détecteur au Centre de Calcul de Lyon ainsi que sur la grille de calcul distribuée EGI pour l'ensemble de la collaboration française

Développement et maintenance d'une interface web de suivi des productions

De plus, le LLR est désormais responsable du système de suivi des alertes transitoires de la collaboration qui permet aux télescopes de recevoir et traiter les alertes et d'effectuer automatiquement la programmation des observations en prenant en compte les conditions d'observation et de visibilité. Ce système permet d'optimiser les observations des sources transitoires tels que les ondes gravitationnelles, les sursauts gamma et les sursauts radio.

Simulation

Plus récemment, le groupe du LLR est à l'origine d'une nouvelle initiative, consistant à simuler de la façon la plus réaliste possible chacune des observations individuelles effectuées par le réseau de télescopes, en prenant en compte la calibration effective de chacun des pixels, la liste des pixels non opérationnels, la trajectoire des télescopes sur le ciel ainsi que de nombreux autres aspects instrumentaux. Ce nouveau paradigme de simulation, dénommé "*RunWise simulation*"⁸, permet de réaliser des simulations plus précises, ne nécessitant pas d'interpolation complexe dans un espace des phases de plus en plus vaste, et plus économes en ressources de calcul et de stockage. De plus en plus utilisé dans la collaboration, il a permis d'obtenir des résultats marquants : la première mesure de l'extension non nulle (bien que très inférieure à la résolution angulaire) de l'émission de très haute énergie de la

⁸ *A runwise simulation and analysis framework for Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope arrays*, *Astropart Phys.* 2020; 123: 102491.

Nébuleuse du Crabe⁹ et plus récemment la première preuve d'une émission résolue d'un noyau actif de Galaxie (Centaurus A)²⁷, émission entendue selon la direction des jets, confirmant de la même façon l'origine de cette émission. C'est la première fois qu'un tel paradigme de simulation est utilisé dans la communauté d'astronomie gamma de très haute énergie, et nul doute qu'il sera tôt ou tard mis en place dans CTA, car c'est la seule façon de simuler chaque observation dans un système ayant un très grand nombre de degrés de liberté.

Afin d'améliorer l'inter-calibrage des télescopes, une nouvelle initiative utilisant un drone équipé de diodes LED de différentes couleurs volant au-dessus des télescopes a récemment été testée. Elle a permis d'obtenir un inter-calibrage des télescopes avec un niveau de précision inégalé (mieux que 5 %) et a eu de nombreuses retombées inattendues, comme par exemple la vérification de la précision de pointé des télescopes.¹⁰

Étude des accélérateurs cosmiques

Centre galactique et émission diffuse Galactique

La mise en évidence d'une émission diffuse de très haute énergie (au TeV) à l'échelle de la Galaxie est un projet ambitieux initié dès 2013 avec le groupe de l'Université d'Innsbruck. Il impose le développement de nouveaux outils. Notamment, afin de s'affranchir des techniques de soustraction de fond utilisées dans la communauté, le projet utilise des simulations Monte-Carlo du niveau de bruit attendu dans chaque observation, ce qui n'a jamais été réalisé jusqu'à présent. Financé initialement par une ANR internationale, le projet a continué après la fin de ce financement.

⁹ *H.E.S.S. Collaboration, Abdalla H, Aharonian F, Ait Benkhali F, Angüner EO, Arakawa M, et al. Resolving the Crab pulsar wind nebula at teraelectronvolt energies. Nat Astron.* 2019; 4: 167–173.

¹⁰ *Inter-calibration of atmospheric Cherenkov telescopes with UAV-based airborne calibration system, Astropart Phys.* 2022; 140: 102695.

Grâce aux nombreux outils et techniques développés, notamment dans le cadre de la simulation *RunWise*, le projet entre maintenant dans une phase finale, où différents éléments (fond entièrement simulé, estimation de la contamination résiduelle, etc.) sont assemblés pour produire des cartes d'émission diffuse. Les résultats obtenus récemment sont très encourageants, et ont été présentés lors des dernières réunions de collaboration. Nous espérons voir le projet converger au cours de l'année 2024 avec une publication de grande envergure en ligne de mire. Il reste encore un travail de vérification et de quantification des incertitudes systématiques à conduire. Une publication plus technique, dédiée à l'utilisation des simulations *RunWise* pour la production de cartes de fond dans ce contexte, est également en cours de rédaction.

Radio-galaxies

Voir encadré : Jets de quasars

Les dernières observations de Centaurus A, accumulant plus de 200 heures de données, ont permis de mettre en évidence la première indication d'une émission étendue liée à un noyau actif de galaxie. Cette découverte importante, confirmée après une étude très détaillée utilisant la simulation *RunWise*, implique notamment que l'accélération des particules se fait de façon continue le long des jets, et non uniquement au voisinage immédiat de la base du jet. Ce résultat important (**Figure 54**) a été publié en 2020 dans la revue *Nature* et a fait l'objet d'un communiqué de presse international coordonné par le CNRS.

Nuages de Magellan

Le Grand Nuage de Magellan constitue la seconde cible prioritaire pour l'étude de la propagation des rayons cosmiques de part sa proximité, les densités élevées de rayonnement et de particules qui y règnent, sa forte activité stellaire et sa position dans l'hémisphère Sud bien adaptées aux observations par H.E.S.S.

Jets de quasars : accélérateurs de particules sur des milliers d'années-lumière (publication H.E.S.S.)

H.E.S.S. Collaboration, Resolving acceleration to very high energies along the jet of Centaurus A, Nature Vol. 582 (2020) 356-359.

Les noyaux actifs de galaxie constituent la quasi-totalité des sources extragalactiques détectées en astronomie gamma de très haute énergie. Parmi ces dernières, la plupart appartiennent à la catégorie des blazars, dont les jets de matière ultra-relativiste pointent pratiquement dans la direction de la Terre. Cet alignement rend impossible la détermination du lieu de l'émission gamma de très haute énergie.

Quelques radio-galaxies, observées plus sur la tranche, permettent de rechercher la localisation de l'émission de très haute énergie : près du noyau central, à la base des jets ou dans les lobes terminaux, et aussi de poser des contraintes sur les modèles. Deux de ces objets, M 87 et Centaurus A, ont été détectés par H.E.S.S. L'observation simultanée d'une éruption de M 87 lors d'une campagne multi-longueur d'onde en 2011 a permis de contraindre fortement la région d'émission aux régions les plus centrales, à proximité immédiate du trou noir supermassif central et d'exclure en particulier les noyaux brillants observés par le Hubble Space Telescope à une distance de quelques kpc. Le trou noir avalerait la matière qui tombe sur lui en spirale et en éjecterait une petite portion sous la forme de grands jets de plasma, à des vitesses relativistes proches de celle de la lumière, contribuant à la redistribution de la matière dans l'Univers.

Au sein de la collaboration H.E.S.S. nous avons mené une étude approfondie de la radio-galaxie Centaurus A, la plus proche de la Terre, en accumulant plus de 200 heures de données. Afin d'exploiter de façon la plus précise possible ces observations profondes, nous avons développé avec nos collègues de l'Université d'Innsbruck en Autriche une méthode novatrice de simulation consistant à simuler de la façon la plus réaliste possible chacune des observations individuelles effectuées par le réseau de télescopes, en prenant en compte la calibration effective de chacun des pixels, la liste des pixels non opérationnels, la trajectoire des télescopes sur le ciel ainsi que de nombreux autres aspects instrumentaux. Ce nouveau paradigme de simulation, dénommé "RunWise simulation" permet de réaliser des simulations plus précises, ne nécessitant pas d'interpolation complexe dans un espace des phases de plus en plus vaste, et plus économes en ressources de calcul et de stockage. Il constitue une première dans la communauté d'astronomie gamma de très haute énergie. Grâce à cet outil, nous avons pu modéliser plus précisément la résolution angulaire du réseau de télescopes et réduire significativement les incertitudes systématiques. Ce travail a permis de mettre en évidence une émission gamma étendue de la radio galaxie Centaurus A à une échelle nettement inférieure à la résolution angulaire de l'instrument et alignée selon la direction des jets. Cette mesure a permis de montrer que l'accélération de particules ne se fait pas uniquement à proximité du trou noir mais également le long des jets de plasma sur une distance d'au moins plusieurs milliers d'années-lumière. C'est la première fois qu'une émission gamma étendue est ainsi associée à un noyau actif de galaxie. Cette découverte suggère également que de nombreuses radiogalaxies aux jets étendus pourraient accélérer des électrons à ces énergies extrêmes et émettre des rayons gamma, ce qui permettrait d'expliquer une partie substantielle du rayonnement de fond gamma diffus extragalactique.

Ce résultat très important, avec une contribution majeure de l'équipe du LLR dans

l'analyse de données et la production de fonctions de réponses, a été publié en 2020 dans la revue Nature et a fait l'objet d'un communiqué de presse international coordonné par le CNRS. La **Figure 54** ci-dessous montre une image composite de la galaxie Centaurus A révélant les jets de plasma expulsés - et l'émission gamma associée - par le trou noir supermassif du centre de la galaxie.

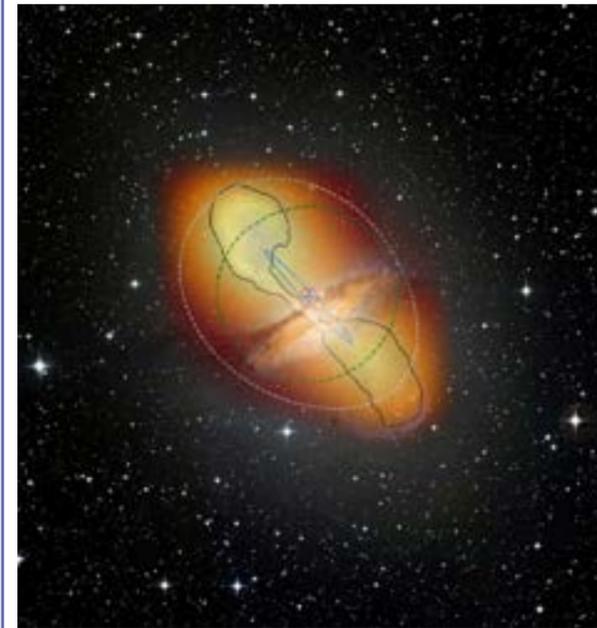


Figure 54 : Image composite de la galaxie Centaurus A révélant les jets de plasma expulsés - et l'émission gamma associée - par le trou noir super massif du centre de la galaxie. (ESO, WFI, MP Institute for Radio Astronomy, APEX, A. Weiss et al., NASA, CXO, Center for Astrophysics, R. Kraft et al., H.E.S.S. collaboration).

Une première détection convaincante a été obtenue en 2021 par un étudiant en thèse du groupe, Jacques Muller, mais il convient maintenant de pousser le projet plus loin, afin de notamment pouvoir déterminer les caractéristiques spectrales et morphologiques de cette émission. Pour ce faire, des observations réalisées dans des conditions plus variées que dans le projet initial devront être utilisées (et notamment les données prises avec les nouvelles caméras, ainsi que les données prises sous angle zénithal élevé) et assemblées. De nouvelles observations sont également programmées en 2023 pour disposer d'une couverture plus homogène sur l'ensemble de la Galaxie. Enfin, les modèles de fond simulés devront être produits dans différentes bandes en énergie afin de pouvoir accéder au spectre en énergie de l'émission diffuse, ainsi qu'à des cartes résolues en énergie. Ce dernier point requiert des développements assez conséquents

qui seront réalisés en collaboration avec Mr Nukri Komin, actuellement en poste à l'Université de Johannesburg. Une demande de financement sur un dispositif de collaboration entre la France et l'Afrique du Sud pour un étudiant en thèse avait été déposée en 2021 sans succès, mais nous allons réitérer la demande et espérons pouvoir mener ce projet à bien. Le but du projet est de produire un catalogue "final" du Grand Nuage de Magellan en rayons gamma de très haute énergie, comportant les différentes sources astrophysiques résolues au-dessus de l'émission diffuse mesurée.

Spectre des électrons

La mesure du spectre en énergie des électrons cosmiques est d'une haute importance astrophysique, car elle recèle quantité d'informations relatives à la propagation des particules chargées dans l'environnement de la Galaxie jusqu'au

voisinage de la Terre. Les mesures directes en satellite sont limitées par la statistique à quelques centaines de GeV, et les imageurs Čerenkov sont en principe, de par leur surface effective beaucoup plus élevée, capable d'atteindre quelques dizaines de TeV. Les concernant, la difficulté principale réside dans la contamination hadronique résiduelle, qui augmente avec l'énergie.

Une première mesure du spectre des électrons, publiée par H.E.S.S. en 2008, a montré une brisure spectrale à une énergie de ~ 1 TeV et une étude détaillée effectuée par un étudiant en thèse (Daniel Kerzberg) sur une statistique plus élevée, a confirmé ce résultat mais n'a pas pu être publiée du fait d'une incertitude trop élevée sur la contamination hadronique résiduelle, ainsi que du fait de problèmes méthodologiques.

Ce projet d'envergure a été repris au LLR, en le poussant plus loin en termes de précision à travers une méthodologie précise et de nombreux tests systématiques. Tout d'abord, la statistique utilisée est multipliée par un facteur 10 pour atteindre plus de 5 000 heures d'observation en utilisant des données prises sur de plus grandes régions du ciel et dans des conditions plus variées. Ensuite, les fonctions de réponse sont maintenant produites par des simulations *RunWise* dédiées : pour chaque observation, une simulation d'un flux d'électrons diffus sur tout le champ de vue est ainsi produite, afin d'améliorer la précision et de réduire les effets systématiques non contrôlés. Les outils d'analyse ont été adaptés pour pouvoir utiliser les événements sur une région définie du champ de vue, différente pour chaque observation, au lieu d'une direction spécifique sur le ciel. Une nouvelle méthode de détermination du spectre a été mise en place, prenant en compte correctement la matrice de dispersion en énergie. Enfin, la stratégie initialement utilisée, consistant à utiliser des coupures très dures pour réduire le fond hadronique

(à un niveau difficilement mesurable), a été remplacée par une autre consistant à mesurer le fond hadronique résiduel et à corriger le spectre en fonction. Le résultat final de cette analyse a été montré¹¹ à la conférence ICRC 2023. La publication correspondante a été acceptée par PRL.

3.4.4 Multi-longueurs d'onde et multi-messagers avec Fermi et H.E.S.S.

Le spectre de la plupart des sources gamma s'étendant de la radio au TeV, leur étude nécessite une approche multi-longueurs d'onde, mise en œuvre depuis de nombreuses années. Ce qui est plus récent, c'est qu'il est maintenant possible de détecter d'autres messagers accompagnant l'émission gamma. C'est en effet en 2017 qu'a été détectée la contrepartie gamma d'une onde gravitationnelle vue par LIGO/Virgo (GW 170817) et que l'activité d'une source gamma a été observée en coïncidence avec un neutrino vu par IceCube. Notre implication dans des études multi-longueurs d'onde est ancienne et nous avons commencé à développer une activité multi-messagers, en particulier dans le cadre de l'ANR "MOTS" (*Multi-Messenger Observations of the Transient Sky*) avec nos collègues au CEA et à l'IJCLab.

Problématique observationnelle

Contrairement au ciel visible, le ciel gamma est particulièrement variable et le temps caractéristique de variabilité peut être très court (de l'ordre de quelques secondes pour certains sursauts gamma par exemple). Par conséquent, obtenir des observations simultanées à plusieurs longueurs d'onde est un vrai défi observationnel. C'est pourquoi a été mis en place un réseau mondial d'alerte qui permet à des télescopes de prévenir la communauté qu'un événement transitoire est en train d'avoir lieu afin qu'un maximum d'autres télescopes

¹¹ de Naurois M., *The Very-High-Energy electron spectrum observed with H.E.S.S., Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2023)*. SISSA Medialab; 2023. p. 261

puissent l'observer. Fermi-LAT et H.E.S.S. font naturellement partie de ce réseau d'alerte.

Surveillance du ciel par FERMI

Comme Fermi a un grand champ de vue et couvre tout le ciel en 3h, il est bien placé pour détecter des phénomènes transitoires. Nous participons activement au programme de monitoring du ciel par Fermi en effectuant plusieurs astreintes "*Flare advocate*" (recherche d'augmentation de flux sur une échelle de temps de plusieurs heures ce qui correspond souvent aux AGNs) ou "*Burst advocate*" (échelle de temps de quelques secondes correspondant aux GRBs) : il s'agit pendant une semaine d'analyser en direct les nouvelles données pour détecter des émissions transitoires et, le cas échéant, d'alerter la communauté via des "*Gamma-ray Circulars*" (plutôt pour les GRBs) ou des "*Astronomy Telegrams*" (ATels ; plutôt pour les AGNs). Le but des ATels étant d'alerter la communauté de la survenue d'événements intéressants dans le ciel, il y a quelques critères à respecter :

- C'est la première fois que la source est détectée dans un état élevé de flux (seuil : 10^{-6} ph $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$).
- La source est détectée dans un état plusieurs fois plus élevé que dans le catalogue le plus récent de Fermi-LAT.
- Pour les sources qui varient souvent, l'augmentation de flux doit être marquée et/ou être accompagnée par un changement important du spectre.

Pour effectuer une astreinte *Flare advocate* il faut non seulement être un(e) expert(e) de l'analyse des données Fermi mais aussi avoir une bonne connaissance du ciel au GeV. Ces ATels permettent à la communauté de déclencher des observations de suivi pour étudier l'évolution du flux surtout pour les instruments Čerenkov au sol et entraînent parfois une publication conjointe entre des groupes de Fermi et d'observatoires Čerenkov. Par exemple, l'ATel 16268¹² du 04/10/2023 a annoncé la première

¹² <https://www.astronomerstelegam.org/?read=16268>

détection d'une émission gamma provenant de PMN J1254-2000, un blazar de type FSRQ, et l'ATel 16356¹³ du 01/12/2023 a déclenché des observations du blazar OP 313 avec le prototype de *Large-Sized Telescope* de CTA. Grâce à cet ATel, une émission à très haute énergie a été détectée pour la première fois. Ce blazar est particulièrement intéressant puisque c'est le blazar le plus distant qui a jamais été détecté à très haute énergie.

Stratégie observationnelle de H.E.S.S.

Ayant un champ de vue beaucoup plus petit que Fermi, H.E.S.S. ne permet pas une surveillance du ciel gamma. L'enjeu est plutôt de répondre aux alertes en pointant le plus rapidement possible sur des sources détectées à plus basse énergie. Comme la boîte d'erreur de la position de ces sources peut être grande, nous avons fortement contribué au développement de *tilepy*¹⁴, un outil d'optimisation du suivi de ces sources, qui prend en compte la position des galaxies connues pour choisir les observations prioritaires. Cet outil est utilisé actuellement dans le cadre du suivi des alertes de détection d'ondes gravitationnelles par LIGO/Virgo, et des sursauts gamma détectés par des instruments tels que Fermi-GBM et le futur SVOM-GRM. L'outil *tilepy* est actuellement utilisé dans trois collaborations internationales : H.E.S.S., CTA, et LST. Il peut être installé avec Git et le code source est à accès ouvert. Pour faciliter l'utilisation de *tilepy*, l'outil est directement accessible via son API. De plus, *tilepy* est intégré dans la plateforme Astro-COLIBRI¹⁵ dédiée au suivi des événements transitoires et peut être utilisé en un seul clic.

Compréhension des mécanismes d'émission

Noyaux actifs de galaxies :

Depuis le début de la mission Fermi-

¹³ <https://www.astronomerstelegam.org/?read=16356>

¹⁴ <https://github.com/astro-transients/tilepy>

¹⁵ <https://astro-colibri.com/>

LAT, le groupe astronomie gamma du LLR a été très impliqué dans l'étude des noyaux actifs de galaxies (AGNs). L'objet central des AGNs est un trou noir massif ($10^9 M_{\text{Soleil}}$) entouré par un disque d'accrétion avec des jets le long desquels des particules sont accélérées jusqu'au TeV. Les propriétés observables d'un AGN dépendent de l'angle de visée : si l'un des jets pointe vers nous, il s'agit de blazars, sinon il s'agit de galaxies radio. La plupart des objets détectés en gamma sont des blazars. Pour les quelques galaxies radio vues en gamma, l'émission peut être étendue. Il reste de nombreuses questions ouvertes à propos des AGNs notamment sur la formation des jets et sur les processus d'accélération et la nature des particules dans les jets, notamment sur la possibilité que les AGNs soient les sources qui accélèrent les rayons cosmiques jusqu'aux très hautes énergies ou qu'ils produisent des neutrinos.

Les blazars sont séparés en deux classes, les flat spectrum radio quasars (FSRQs) et les objets BL Lacertae (BL Lacs), qui se distinguent par un environnement différent autour de l'objet central, ce qui entraîne des spectres et caractéristiques d'émission différents. L'étude d'objets de ces deux classes nous permet de comprendre leurs particularités et leurs différences ce qui conduit vers une compréhension plus générale des blazars dans leur ensemble. Notre expertise dans l'analyse des données multi-longueur d'onde, notamment "GeV-TeV", et dans celle des courbes des lumières sont deux atouts importants pour améliorer notre compréhension de tels systèmes.

BL Lac - 1ES 12125+303 :

En collaboration avec nos collègues à l'Université Columbia (New York, USA), et de nombreux collègues qui travaillent au travers le spectre, nous avons mené une étude détaillée de 1ES 1215+303, un blazar de type BL Lac. Ce travail comprenait une étude spectrale et temporelle détaillée multi-longueurs

d'onde du blazar. Nous avons coordonné un travail impliquant de nombreux instruments : radio (OVRO, Metsähovi, VLBA et MOJAVE/VLBA), optique (Tuorla et NOT), UV (Swift-UVOT), rayons X (Swift-XRT) et rayons gamma (Fermi-LAT et VERITAS). Ce travail nous a permis notamment de mettre en évidence un changement extrême de l'énergie du pic de l'émission synchrotron de l'infrarouge vers les rayons X mous, ce qui remet en question de nombreux schémas de classification de longue date pour l'AGN. Nous avons également découvert, pour la première fois, une tendance à l'augmentation à long terme du flux aux longueurs d'onde des rayons gamma et optiques.

FSRQs - 3C 279, PKS 1222+216 et Ton 599 :

De nouveau en collaboration avec nos collègues de VERITAS à Columbia, nous avons mené une étude sur trois blazars de type FSRQ. Ce sont les blazars les plus lumineux au GeV mais leur émission est rarement détectée au TeV, généralement lors d'éruptions lumineuses au GeV. Nous avons étudié la variabilité et les caractéristiques spectrales de ces trois FSRQ aux énergies GeV et TeV par Fermi-LAT et VERITAS, en utilisant près de 100 heures d'observations VERITAS réparties sur 10 ans. Nous avons expliqué les distributions de flux au GeV des sources avec un modèle dérivé d'une équation différentielle stochastique décrivant les fluctuations du champ magnétique dans le disque d'accrétion et nous avons estimé les échelles de temps d'accumulation de flux magnétique et d'instabilités stochastiques dans leurs disques d'accrétion. Nous avons identifié des éruptions distinctes à l'aide d'une procédure basée sur des blocs bayésiens et nous avons analysé leur variabilité quotidienne et infra-quotidienne ainsi que les spectres d'énergie des rayons gamma. À l'aide des observations de VERITAS, ainsi que de Fermi, Swift et du *Steward Observatory*, nous avons modélisé les distributions d'énergie spectrale à large bande de PKS 1222+216

et Ton 599 lors d'éruptions détectées à très haute énergie (VHE) en 2014 et 2017, respectivement, contraignant fortement les facteurs Doppler du jet et les emplacements des régions d'émission de rayons gamma au cours de ces événements. Enfin, nous avons imposé des contraintes théoriques sur la production potentielle de neutrinos à l'échelle PeV lors de ces éruptions à très haute énergie.

Sursauts gamma :

Le LLR est impliqué dans la caractérisation des sursauts gamma à très haute énergie. Entre 2002 et 2018, les télescopes Čerenkov ont observé des sursauts gamma sans aucune détection à très haute énergie. En 2018 et 2019, 3 détections ont été faites par H.E.S.S. et MAGIC. L'absence de détection entre 2002 et 2018 constituait une énigme pour la communauté. Pour résoudre cette énigme, nous avons cherché parmi tous les GRBs vus par Swift durant les 20 dernières années ceux qui étaient potentiellement détectables par des IACTs en tenant compte de la visibilité, des conditions d'observation, des performances de l'instrument et de la configuration des télescopes. Cela nous a permis de montrer¹⁶ que le taux de détection de GRB était de moins d'un par an pour H.E.S.S., MAGIC ou VERITAS et d'environ quatre par an pour CTA.

Les membres du groupe LLR sont aussi forcément impliqués dans le suivi des sursauts gamma avec H.E.S.S.. L'un des plus intéressants est le sursaut gamma le plus brillant de tous les temps, GRB 221009A. Les analyses de H.E.S.S. ont été effectuées au LLR. Les données n'ont pas été prises dans des conditions optimales (atmosphère perturbée caractérisée par une forte teneur en aérosols), ce qui a nécessité des corrections supplémentaires pour

¹⁶ Ashkar H, Sangaré A, Fegan S, Damascene Mbarubucyeye J, Ruiz-Velasco E, Zhu SJ, *The Case of the Missing Very High-energy Gamma-Ray Bursts: A Retrospective Study of Swift Gamma-Ray Bursts with Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes.*, *ApJ*. 2024; 964: 57.

tenir compte des biais atmosphériques dans l'analyse. Aucune émission VHE n'a été détectée mais les limites supérieures obtenues¹⁷ montrent qu'un scénario probable dans lequel l'émission non thermique est due à une seule population d'électrons partiellement refroidis n'est pas susceptible d'être dominé par le phénomène de Compton inverse. En outre, les observations H.E.S.S. imposent des contraintes sur la courbe de lumière déduite par LHAASO, révélant que, pour l'émission rémanente, la courbe de lumière des rayons gamma VHE diverge de la relation précédemment établie avec la courbe de lumière des rayons X. Cette observation souligne un changement perceptible de l'émission VHE, suggérant que ses caractéristiques à des moments tardifs peuvent différer de celles observées à des moments antérieurs.

Ondes gravitationnelles :

Le groupe du LLR dirige actuellement les efforts de la collaboration H.E.S.S. pour étudier les émissions de très haute énergie des ondes gravitationnelles au cours de la quatrième campagne d'observation de LIGO/Virgo. Dû à de nombreux problèmes instrumentaux, Virgo n'a pu participer à la première moitié de cette campagne (mai 2023 – janvier 2024), ce qui a dégradé la localisation des ondes gravitationnelles détectées pendant cette période. Malgré cela, H.E.S.S. a pu suivre trois de ces événements avec une bonne couverture. Ces événements ont été utilisés pour tester la réponse et les stratégies de H.E.S.S. aux alertes d'ondes gravitationnelles. Notre suivi des alertes va reprendre dès le début de la deuxième partie de cette campagne d'observation (fin du mois de mars 2024).

Fast Radio Bursts :

L'origine des sursauts radio rapides (FRBs), d'une durée de quelques millisecondes, est inconnue. Il s'agit de sources extragalactiques mais nous

¹⁷ Aharonian F, Ait Benkhali F, Aschersleben J, Ashkar H, Backes M, Baktash A, et al. *H.E.S.S. Follow-up Observations of GRB 221009A.* *ApJL*. 2023; 946: L27.

n'en connaissons pas la nature exacte. Nous participons à l'organisation au niveau mondial de plusieurs campagnes d'observation simultanée entre observatoires radio, optiques, X et gamma pour chercher des contreparties des FRBs. Nous avons aussi cherché un lien spatial entre les FRBs et les sources transitoires gamma, notamment les GRBs, en examinant les données d'archives des 20 dernières années provenant d'observatoires de GRBs tels que Swift et Fermi. Le modèle envisagé est celui où un GRB est créé par un événement cataclysmique donnant naissance à un magnétar, qui interagit ensuite avec son environnement et génère des FRBs. Les résultats ne montrent aucune corrélation entre les FRBs et les GRBs avec des données simultanées¹⁸

3.4.5 Méthodes innovantes de polarimétrie des rayons γ par conversion e^+e^-

Un groupe du LLR a développé un ensemble de méthodes expérimentales, de simulation et d'analyse, relatives à la mesure de la fraction et de l'angle de polarisation linéaire de photons de haute énergie, les rayons gamma, émis par des sources cosmiques, qui se convertissent en une paire électron-positron dans la cible active d'un télescope sur mission spatiale.

Émission polarisée des sources gamma

Plusieurs processus à l'origine de l'émission gamma des sources cosmiques, comme par exemple le rayonnement synchrotron émis par une particule chargée traversant un champ magnétique ou la diffusion Compton inverse d'un photon de basse énergie sur un rayon cosmique (chargé) de haute énergie, produisent un rayonnement polarisé linéairement. D'autres phénomènes, comme l'interaction hadronique d'un proton ou d'un noyau de haute énergie avec le milieu ambiant, produisent des

¹⁸ Ashkar H, Bouhaddouti ME, Fegan S, Schüssler F. All sky archival search for FRB high energy counterparts with Swift and Fermi. 2023. Available: <http://arxiv.org/abs/2309.02883>

mésons π^0 dont le spin est nul, et qui se désintègrent donc en photons gamma non polarisés.

Pour les noyaux actifs de galaxie (AGN), les modèles hadroniques ou lepto-hadroniques prédisent une forte polarisation, contrairement aux modèles leptoniques. Pour les pulsars, le niveau de polarisation attendu dépend de l'altitude de la zone d'émission.

Polarimétrie

L'astronomie de haute énergie (diffusion Compton, conversion de paires) procède par l'analyse de l'interaction de photon individuel dans une cible active, dans laquelle la conversion et la trajectographie des produits de conversion ont lieu. Pour une conversion en paire, l'angle azimutal φ est mesuré à partir des trajectoires de l'électron et du positron. Le problème principal est la distorsion des trajectoires induite par la diffusion multiple de ces particules chargées à leur traversée du trajectographe. Pour une cible active formée de détecteurs silicium de quelques centaines de microns d'épaisseur telle que le trajectographe de Fermi-LAT, par exemple, on peut montrer qu'une grande partie de l'information azimutale est perdue avant même que les leptons soient sortis de la couche de conversion.

HARPO

Lors de la période précédente, nous avons développé une méthode utilisant une cible active de faible densité (un volume de gaz) et de grande précision, selon la technique éprouvée en physique des particules de la chambre à projection temporelle. Les électrons produits par l'ionisation du gaz à la traversée des 2 traces dérivent dans un champ électrique uniforme et sont collectés sur une anode segmentée à 2 dimensions. La durée de la dérive est mesurée et fournit la 3^{ème} coordonnée, et l'on obtient ainsi une image digitisée tridimensionnelle de l'évènement. Nous avons formé une collaboration avec le CEA-Saclay

pour construire un prototype dédié sur financements du LabEx P2IO et de l'ANR, que nous avons testé sur un faisceau de photons gamma mono-énergétique et complètement polarisé, ou non polarisé. Nous avons obtenu¹⁹ une asymétrie de polarisation effective de 10 % à une énergie de 12 MeV, ce qui comparé à la prédiction de 20 % de l'électrodynamique quantique donne une perte due aux effets de mesure d'un facteur 2.

Un générateur d'évènement 5D pour Geant4 (G4BetheHeitler5DModel)

À la conception d'HARPO, aucun générateur d'évènements selon la section efficace différentielle dite de Bethe-Heitler (non polarisée ou polarisée) n'était disponible. Les modèles disponibles négligeaient l'impulsion de recul de la cible, faille importante pour une astronomie gamma de précision, la conversion était donc simulée faussement coplanaire et surtout la génération était basée sur le tirage au hasard de 3 distributions unidimensionnelles non corrélées, ne reproduisant donc pas l'ensemble des corrélations présentes dans la section efficace différentielle de QED, qui est cinq fois différentielle.

Nous avons conçu une méthode d'échantillonnage selon laquelle chaque étape de la réaction, (interaction du photon avec la cible pour donner un objet transitoire tandis que la cible recule, suivi de la désintégration de l'objet en un électron et un positron), est réalisée dans le référentiel du centre de masse de l'étape en question, ce qui résout l'essentiel des problèmes de divergence. L'emploi de cette méthode nous a permis de construire un générateur que nous avons validé avec soin²⁰ et qui a été implémenté dans le logiciel Geant4.

Polarimétrie gamma avec le Large Area Telescope de Fermi

¹⁹ P. Gros et al., "Performance measurement of HARPO: A time projection chamber as a gamma-ray telescope and polarimeter", *Astropart. Phys.* 97 (2018) 10

²⁰ D. Bernard, "A 5D, polarised, Bethe-Heitler event generator for $\gamma \rightarrow e^+e^-$ conversion", *Nucl. Instrum. Meth. A* 899 (2018) 85.

Nous avons étudié la sensibilité du LAT de Fermi à la polarisation, tâche qui ne fut pas simple car le détecteur n'a pas été conçu pour cela. Avec une reconstruction d'évènements dédiée à la polarimétrie, nous avons tout d'abord montré, à l'aide d'une petite maquette logicielle développée localement, que l'asymétrie de polarisation effective du LAT est certes faible mais, au-dessous du GeV, elle n'est pas nulle²¹.

Nous préparons la mesure de la polarisation de la source la plus brillante du ciel gamma dans la plage en énergie de sensibilité à la polarimétrie du LAT, le pulsar Vela, sur les 15 années de données déjà acquises. Nous utilisons l'ensemble logiciel complet du LAT, modifié pour inclure le générateur d'évènement correct G4BetheHeitler5DModel, et une sélection d'évènements adaptée à la polarimétrie. Les performances obtenues de l'analyse de données simulées sont semblables à celles de l'estimation simpliste: une asymétrie de polarisation qui pique à 2 % vers 100 MeV et une précision attendue de 20 % sur la fraction de polarisation²².

3.4.6 Astronomie- γ avec l'expérience CTA

Introduction

CTA est un projet d'observatoire d'astronomie des rayons gamma de très haute énergie (VHE) qui comprend deux grands réseaux de télescopes Čerenkov: un sur l'île de La Palma (CTA-nord) et un sur le Cerro Paranal dans le désert d'Atacama au Chili (CTA-sud). Il prendra progressivement la suite des réseaux actuels H.E.S.S., VERITAS et MAGIC entre 2025 et 2030. La configuration actuelle de CTA, complètement financée, prévoit 51 télescopes pour CTA-sud et 13 télescopes pour CTA-nord. Pour CTA-nord, il s'agit de 4 télescopes de grande taille (large-sized telescopes, LSTs) et 9 télescopes

²¹ Bernard, "MeV-GeV Polarimetry with $\gamma \rightarrow e^+e^-$: Asserting the Performance of Silicon Strip Detectors-Based Telescopes", *Nucl. Instrum. Meth. A* 1042 (2022) 167462.

²² A. Laviron et al., "MeV-GeV polarimetry with the Fermi-LAT", *PoS ICRC2023* (2023) 721.

de taille moyenne (medium-sized telescopes, MSTs). NectarCAM, la caméra des 9 MSTs de CTA-nord est la principale contribution de la France au projet IN2P3. Le groupe mécanique du LLR a conçu les structures mécaniques des caméras des 9 MSTs de CTA-nord et suit actuellement leur fabrication.

L'activité de groupe CTA depuis 2019 a porté sur NectarCAM ainsi que sur la préparation des analyses.

Mise en service et tests de NectarCam

NectarCAM est une caméra grand champ optimisée pour fonctionner au milieu de la plage d'énergie de CTA. Son champ de vision de 8 degrés promet d'accélérer l'observation du ciel extragalactique et la découverte d'événements transitoires mal localisés tels que les GRB et les événements d'ondes gravitationnelles.

La caméra est logée dans une structure de $3 \times 3 \times 2 \text{ m}^3$, pesant 2.2 tonnes, dont la conception est décrite au §3.4.7. Il est équipé de 1855 pixels basés sur des PMT, avec un taux d'échantillonnage nominal de 1 GHz, et peut fonctionner à un taux d'événements soutenu de 10 kHz. Le modèle de qualification de NectarCAM, une version partiellement équipée de la caméra, a été testé sur le prototype de MST à Berlin en 2019, puis mis à niveau vers la configuration finale et re-testé dans la chambre noire du CEA Saclay au cours des années suivantes. Le LLR a été fortement impliqué dans cette mise à niveau et ces tests.

'On-sky testing' à Berlin

En 2018, une campagne de tests de NectarCAM sur le prototype de MST a été convenue avec le DESY. L'équipe scientifique CTA du LLR a contribué à cette campagne de tests de plusieurs manières :

- Le développement d'un ensemble de filtres pour protéger la caméra de la pollution lumineuse très forte provenant de la ville et la simulation de leurs performances avant les tests. Deux filtres ont été préparés : un filtre à large

bande-passante utilisant un film Mylar, et un filtre à bande passante UV qui améliore significativement la lumière Čerenkov par rapport au fond.

- Participation à des shifts d'observation sur site pendant la campagne de tests d'un mois.
- Implémentation d'une suite d'outils d'analyse pour tester les données prises lors de la campagne d'observation, ce qui a permis de fournir des retours le lendemain aux opérateurs pendant la campagne de prise de données.
- Découverte d'un problème significatif dans la conception des ASIC Nectar qui a été résolu par une refonte de la puce après les tests. Une analyse du spectre des codes ADC observés tout au long de la campagne a montré que certains codes n'étaient pas produits, ou peu fréquemment produits, dans le canal à faible gain lorsque le canal à gain élevé était saturé (Figure 55). Cela a été ensuite compris par les concepteurs de l'ASIC comme étant dû à une interférence entre les deux canaux de gain résultant de la saturation, et a été corrigé par une refonte de l'ASIC.
- Première analyse des événements enregistrés de gerbes atmosphériques qui a pu montrer que les événements de type rayons gamma pouvaient être séparés du bruit de fond muonique. Cela a montré que la caméra pouvait distinguer entre différentes espèces d'événements, et est une première étape vers la tâche plus difficile de séparation des rayons gamma des rayons cosmiques.
- Calibration absolue préliminaire de la caméra et du système optique du télescope par observation d'étoiles connues, qui a montré que près de la moitié de la lumière attendue des étoiles était détectée par NectarCAM, ce qui était largement attribuable à la dégradation des miroirs et aux incertitudes sur l'efficacité du filtre et du *baffling*.

Tests thermiques dans la chambre noire du CEA Saclay

Le LLR participe activement aux tests thermiques pour valider les performances de la caméra. Ces tests consistent à

mesurer certains paramètres (piédestaux, gains) à différentes températures (entre -5°C et 15°C) afin de paramétrer la variation des performances de la caméra avec la température. Ces tests sont

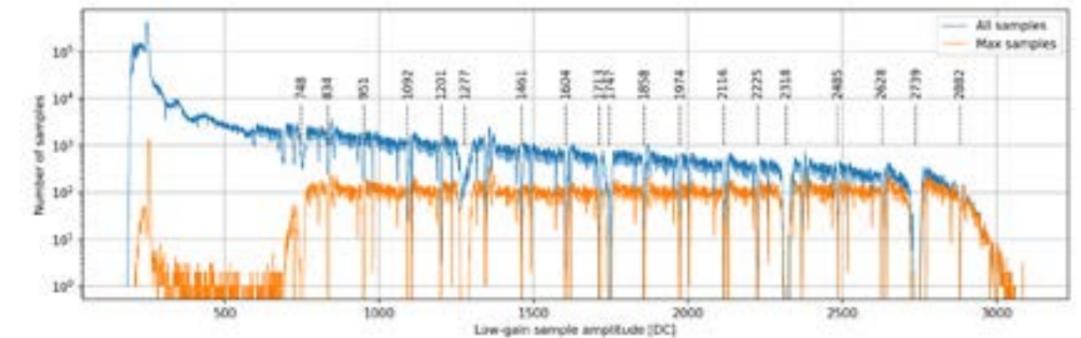


Figure 55 : Spectre des codes ADC à partir des données de NectarCAM montrant des lacunes régulières dues à des codes manquants.

cruciaux pour être en mesure de prendre en compte précisément les changements de température sur le site de La Palma dans le logiciel de reconstruction des événements.

Développement d'une source lumineuse pulsée à 256 LED

De nombreuses caractéristiques de performance de NectarCAM ont été testées à Saclay, telle que la stabilité thermique, comme décrite ci-dessus. Cependant, à ce jour, il n'y a pas eu de test approfondi de la fiabilité globale de la caméra dans des conditions réalistes attendues avec des gerbes atmosphériques aléatoires. CTA exige que la caméra soit disponible avec une fiabilité de plus de 95 %. Pour atteindre cet objectif sur site sans une période de mise en service très longue, le système complet doit être largement testé à l'avance. Dans ce but, nous développons une source lumineuse pulsée à 256 pixels capable de générer des images aléatoires (avec temps, position, intensité, forme et évolution temporelle aléatoires) qui seront projetées sur la caméra de NectarCAM dans la chambre noire. Cela sera utilisé en plus des sources lumineuses de calibration standard de NectarCAM pour générer des ensembles

de données réalistes qui pourront être utilisés pour tester les systèmes de caméra, les logiciels en ligne, les logiciels d'analyse scientifique et les procédures de traitement et d'exploitation des données. La source lumineuse LED est en cours de développement au LLR depuis 2022, une version prototype devant être produite prochainement. Celle-ci sera testée au LLR et à Saclay et une version complète sera produite. Nous commencerons une série de shifts dans le but d'accumuler un grand ensemble de données, idéalement six mois d'observations, qui pourront être utilisées pour tester si la fiabilité du système répond aux exigences de CTA, et pour valider les procédures.

Logiciel de "Data Quality Monitoring" pour NectarCAM

En plus des tests de l'ensemble de données de Berlin discutés ci-dessus, nous avons développé un pipeline semi-automatique pour le traitement des données de NectarCAM prises sur le banc d'essai. Le système applique un ensemble d'analyses standard, calculant des quantités diagnostiques utiles qui sont chargées dans une base de données et également affichées pour tous les membres de NectarCAM sur une série de graphiques standard. Les graphiques

permettent de comparer rapidement les performances de l'instrument entre les Runs et d'accélérer la détection de problèmes potentiels. Un prototype initial de ce système DQM a été produit par S. Fegan, et une version de production a ensuite été implémentée en utilisant le cadre logiciel standard de CTA par H. Ashkar.

Préparation du "Key Science Project" sur les amas de galaxies

L'observation de l'émission gamma dans les amas de galaxies est l'un des 10 projets clés (Key Science Project, KSP) portés par le consortium CTA. Un total de 300 heures d'observation en direction de l'amas de Persée sont prévues pour cela, cet amas étant vraisemblablement la cible la plus prometteuse pour de telles observations.

Le groupe de travail visant à la préparation scientifique de ce projet est divisé en deux parties : l'une pour l'utilisation des amas pour contraindre la nature de la matière noire via annihilation ou désintégration ; l'autre ayant pour objectif de contraindre la physique des rayons cosmiques dans les amas. Les deux groupes travaillent ensemble, car l'émission issue des rayons cosmiques constitue l'un des bruits de fond pour les recherches de matière noire. R. Adam a été nommé co-responsable du groupe de travail.

Les objectifs affichés sont donc d'effectuer une modélisation de pointe du signal pour étudier les perspectives de la recherche de signal diffus gamma dans l'amas de Persée (matière noire et rayons cosmiques conjointement). Nous avons mis en place une stratégie visant au développement d'outils de modélisation, de simulations et d'analyse afin de préparer les observations CTA et leur exploitation scientifique.

Développement d'outils de modélisation du signal

Il était d'abord nécessaire de développer un outil de modélisation de l'émission γ . Cette dernière est reliée à la physique

des rayons cosmiques, mais fait aussi intervenir les propriétés thermiques du gaz chaud et le champ magnétique. La considération d'observations à d'autres longueurs d'onde devient alors pertinente car celles-ci peuvent être sensibles à ces propriétés, en particulier en radio, millimétrique et rayons X. Pour répondre à ces problématiques, nous avons entrepris le développement du code public intitulé *minot (Modelling the intracluster medium (non-)thermal content and observable prediction tools)*²³. Ce code permet de calculer rapidement les observables radios, millimétriques, X, gamma et neutrinos associés à un modèle donné. Le code *minot* est utilisé dans la collaboration CTA (et au-delà) pour la modélisation du signal issu des rayons cosmiques, mais aussi pour estimer le bruit de fond dans le cas des contraintes sur la matière noire.

Application aux données Fermi-LAT avec l'amas de Coma

On s'attend à ce que l'émission gamma soit maximale autour de quelques GeV, c'est-à-dire potentiellement observable avec les données de Fermi-LAT, qui complètent très bien CTA à $\sim 0.1-100$ TeV. La collaboration Fermi-LAT a identifié un excès dans la direction de l'amas de Coma après 6 ans d'observations, ce qui a été confirmé par d'autres analyses. Nous avons donc décidé de réanalyser la région de Coma en utilisant 12 ans de données avec deux objectifs :

- 1) tester les outils de modélisation CTA sur des données réelles,
- 2) construire une analyse complète jusqu'aux contraintes physiques. Du fait de l'importance des résultats obtenus, ce travail a fait l'objet d'une publication²⁴. Il

²³ Adam R, Goksu H, Leingärtner-Goth A, Etori S, Gnatyk R, Hnatyk B, et al., *MINOT: Modeling the intracluster medium (non-)thermal content and observable prediction tools*, *Astron Astrophys Suppl Ser.* 2020 ; 644: A70.

²⁴ Adam R, Goksu H, Brown S, Rudnick L, Ferrari C., *γ -ray detection toward the Coma cluster with Fermi-LAT: Implications for the cosmic ray content in the hadronic scenario*, *Astron Astrophys Suppl Ser.* 2021 ; 648: A60.

a montré qu'un signal significatif était effectivement détecté dans la direction de l'amas de Coma. Bien que son origine n'ait pu être établie avec certitude, les données sont en excellent accord avec une émission diffuse associée à l'ICM. Elles favorisent un profil plutôt plat et un spectre de rayons cosmiques raide, avec une amplitude correspondante à $\sim 1\%$ d'énergie sous forme de rayons cosmiques, relativement à l'énergie thermique. En combinant les données gamma à des données radio, nous avons montré que le modèle purement hadronique était exclu, mais que les données étaient en excellent accord avec le modèle de réaccélération turbulente.

Préparation du projet scientifique CTA

Il est important de pouvoir estimer les caractéristiques du signal attendu et le retour scientifique envisagé par les observations lors de la phase de préparation de CTA. Cette étape est importante, car elle permet d'optimiser la stratégie d'observation, de prédire le temps d'observation nécessaire, et le cas échéant de modifier la configuration de l'instrument si celui-ci n'est pas encore construit. Ce travail a fait l'objet de la publication sur le KSP "amas de galaxies"²⁵

- Étude de la stratégie d'observation : Nous cherchons ici à maximiser les chances de détection. Nous avons entrepris de tester les performances de détection pour différents modèles du signal et différentes manières d'observer. Les résultats ont montré que la meilleure stratégie dépend du type d'analyse et du signal, mais que pointer entre 1 et 1.5 degré du centre est un bon compromis.
- Prédiction du signal attendu via l'utilisation de données multi-longueurs d'onde. Le retour scientifique dépend naturellement de l'intensité du signal attendu. Pour le prédire, nous utilisons le code *minot*, mais cela nécessite de

²⁵ CTA, Abe K, Abe S, Acero F, Acharyya A, et al. *Prospects for γ -ray observations of the Perseus galaxy cluster with the Cherenkov Telescope Array.* 2023. Available: <http://arxiv.org/abs/2309.03712>.

calibrer les propriétés physiques du modèle d'entrée. Nous utilisons deux approches complémentaires à partir de simulations numériques et de données radio, X et millimétriques. Ce travail a montré que les analyses précédentes présentent des contraintes qui sont trop optimistes d'un facteur 3 à cause de l'extrapolation du modèle thermique. De plus, les incertitudes sur le signal gamma montrent que celui-ci ne peut pas être estimé à mieux qu'un facteur 2 au vu des données disponibles.

- Simulation et analyse des données. Afin de tester les performances de CTA, il est nécessaire de simuler et d'analyser les données de manière réaliste. Pour cela, nous avons développé le code public KESACCO (Keen Event Simulation and Analysis for CTA Cluster Observations). KESACCO est utilisé pour définir un modèle du ciel qui inclut le bruit de fond instrumental, la contamination astrophysique induite par les AGN, et le signal provenant de l'amas de Persée. Un modèle des observations est défini, incluant les temps de pose, les pointages, la réponse instrumentale, etc. KESACCO dispose aussi d'une batterie d'outils allant de la mise en forme des données jusqu'aux contraintes sur les paramètres physiques. Cette analyse a montré que CTA permettra de gagner environ un ordre de grandeur par rapport à l'état de l'art des contraintes physiques. De plus, CTA permettra de mesurer le spectre et le profil des rayons cosmiques, mais la présence de la galaxie centrale NGC 1275 limitera fortement les contraintes en cas de spectre raide et de profil compact.

Exploitation de CTA au-delà du projet clé "amas de galaxies"

Au-delà du KSP, il est envisageable d'utiliser d'autres données de CTA pour étudier la physique des amas de galaxies. Nous avons commencé à développer

deux autres approches telles que décrites brièvement ci-dessous.

- Développement d'une méthode d'empilement. Un relevé extragalactique de 1000 h, sur 25 % du ciel, est prévu avec CTA. Afin de tester le pouvoir de contrainte de ces données, nous avons initié le développement d'une approche d'empilement des données à la position d'amas connus. Ce travail a été entrepris dans le cadre d'un stage de deux étudiants (équivalent M1). Il a montré qu'une telle approche, bien que moins efficace que le KSP, permettait d'obtenir un niveau de contraintes comparable. Ce travail devra être poursuivi et pourra donner lieu à une publication. Il a été également utilisé pour nourrir le modèle de ciel défini pour le "CTA Data Challenge" qui est en cours.
- Étude prospective des mesures de l'interaction AGN-ICM. CTA observera des AGN qui, pour certains d'entre eux, sont en interaction avec l'ICM. Nous avons donc entrepris le développement de la mesure des cavités X in-

duites par les AGN à travers un stage. La modélisation du signal et sa simulation ont montré que les données CTA pourraient être très utiles à la compréhension de la rétroaction des AGN sur l'ICM.

3.4.7 Conception des caméras NectarCAM pour CTA

Le projet de Čerenkov Telescope Array (CTA) est un instrument majeur de la prochaine génération d'expériences d'astronomie gamma au sol. L'observatoire comportera des réseaux de télescopes (Figure 56) de grande, moyenne et petite taille, couvrant le ciel des 2 hémisphères.

En tant que laboratoire pionnier dans le domaine de l'astronomie gamma au sol et fort de ses contributions aux caméras des projets H.E.S.S. et H.E.S.S. 2, le LLR est impliqué dans les développements techniques pour le projet à travers la responsabilité du WP6 *mécanique et refroidissement* : conception et réalisation de la structure mécanique des



Figure 56 : Télescope de taille moyenne (MST) pour le projet Čerenkov Telescope Array (CTA) composé de miroirs de forme hexagonale créant un réflecteur uniforme d'environ 12 mètres de diamètre. La surface réfléchissante de 88 m² recueille et concentre la lumière Čerenkov dans la caméra, où la lumière peut être numérisée et traitée. Le site nord de CTA fonctionnera avec les caméras NectarCAM à grand champ de vision (environ 8°) et utilisant des photomultiplicateurs.

caméras NectarCAM et du système de refroidissement.

Le projet CTA utilisera 9 caméras destinées aux télescopes dits de taille moyenne (*Medium Size Telescopes - MST*) sur le site nord de La Palma aux îles Canaries. Le module de base élémentaire de chaque caméra consiste en un module de 7 pixels photomultiplicateurs associé

à ses cartes électroniques frontales, de digitisation et de déclenchement (Figure 57). L'ensemble de la caméra comprend 265 modules, soit 1855 pixels, constituant le plan focal de la caméra. La structure mécanique de NectarCAM mesure 3 × 3 × 1.5 m³ et est constituée de 9 éléments (Figure 58).

La division de la structure en 9 éléments donne une certaine flexibilité lors des

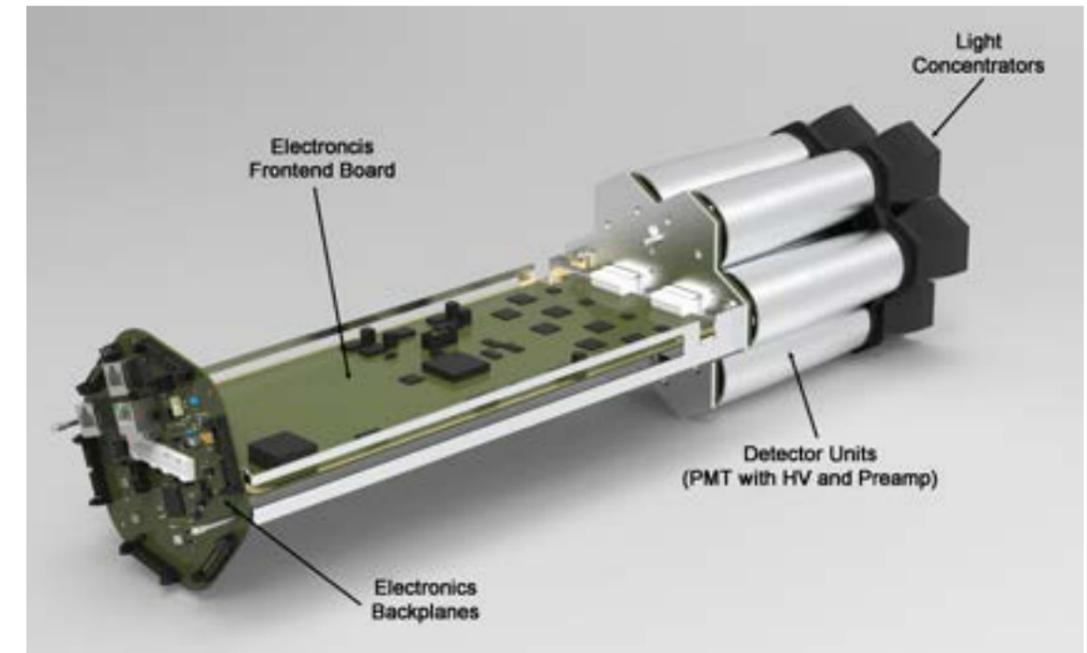


Figure 57 : Module élémentaire d'une caméra NectarCAM pour le projet CTA.

phases de construction et intégration :

- Assemblage mécanique des modules ;
- Structure support des modules (vue arrière, Figure 59 à gauche) ;
- Structure tubulaire de la caméra (Figure 59 ; au centre)
- Boîtier de la caméra ;
- Structure support de la partie électronique acquisition de data et trigger ;
- Armoires/châssis électriques ;
- Services et support passages de câbles
- Système de refroidissement ;
- Fenêtre – objectif de la caméra (Figure 59 à droite)

Actuellement, le module de qualification est assemblé et en cours de tests au CEA Saclay. Une ultime revue a validé ce

module de qualification à l'été 2024, puis le module sera livré sur le site nord début 2025.

Depuis le début 2024, 4 autres structures mécaniques ont été livrées en France par la société espagnole titulaire du marché de la structure mécanique. Ces 4 structures sont en cours de montage. Les 4 dernières structures mécaniques doivent être livrées en France avant la fin de l'été 2024.

Pour ce projet, le LLR est également responsable de l'assurance qualité et sa coordination avec les homologues des télescopes MST et de l'observatoire CTA.

3.4.8 TeVCats un catalogue de sources γ au TeV

Il existe de nombreux observatoires dans le monde dédiés à l'astronomie TeV. Ceux-ci sont situés dans les deux hémisphères et ont accès à différentes bandes de déclinaison dans le ciel qui ne se chevauchent pas toujours. Ils ont différents seuils d'énergie donnant lieu à une meilleure sensibilité à des énergies plus faibles ou plus élevées,

des résolutions angulaires variables - certaines étant plus sensibles aux structures à grande échelle, d'autres aux sources ponctuelles et des priorités d'observation différentes résultant en différentes stratégies d'observation (études en profondeur versus surveillance de nombreuses sources potentielles). Cela signifie qu'il n'existe pas de catalogue uniforme de sources TeV qui soit publié par une seule autorité

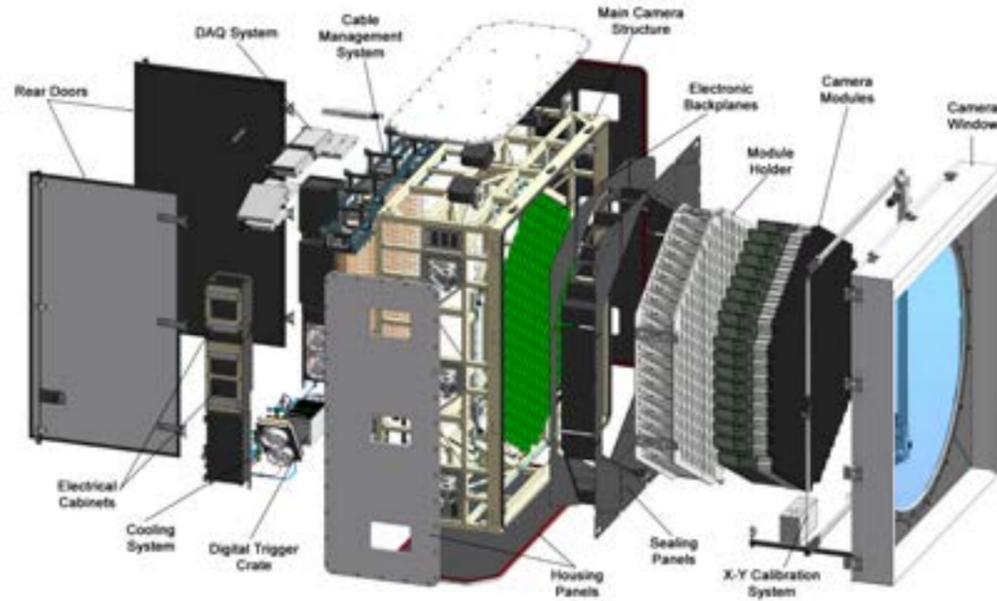


Figure 58 : Vue éclatée de la caméra NectarCAM.

et contenant toutes les informations (dans un format uniforme) sur l'ensemble du ciel provenant de tous les instruments TeV. Il n'existe pas d'équivalent à un Fermi 4FGL, à un *Einstein Slew Survey* ou à un catalogue Parkes-MIT-NRAO. Chaque

équipe d'observateurs publie ses propres résultats, parfois un article par source, d'autres fois avec plusieurs sources et limites supérieures dans un seul article. Parfois, ces articles sont publiés dans des revues à comité de lecture, tandis



Figure 59 : Vue de divers éléments de la structure des caméras NectarCAM pour CTA.

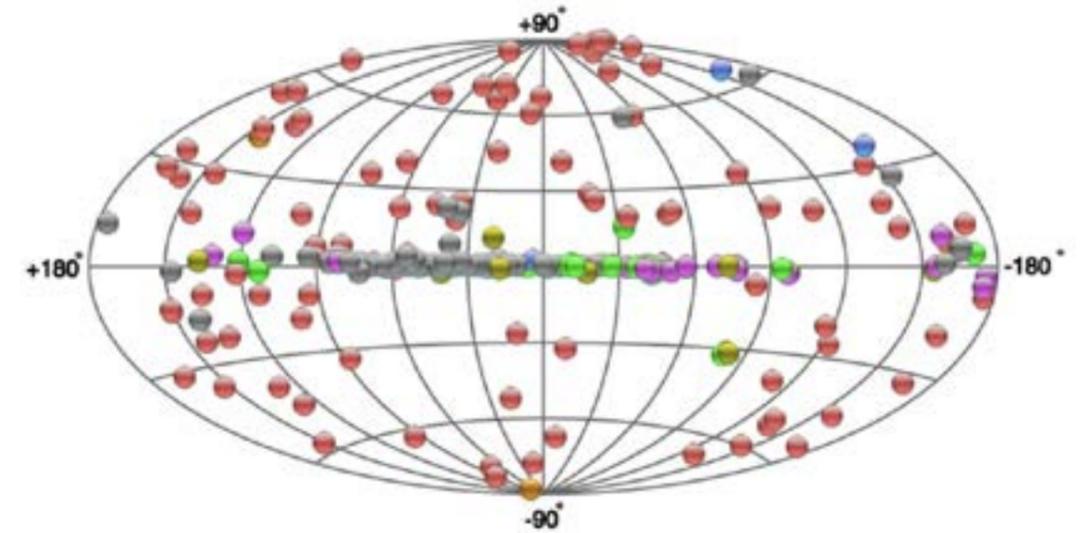


Figure 60 : Carte de ciel de TeVcat avec indication et positionnement des sources de γ au TeV.

que d'autres fois, en raison du nombre de sources détectées aujourd'hui aux énergies TeV, de nouvelles sources sont annoncées sur des posters lors de conférences. Il n'existe donc aucun moyen de connaître l'état actuel du ciel au TeV en tant qu'astrophysicien(ne) du TeV, ou en tant qu'observateur intéressé(e) ou en tant que tout autre personne. Il faudrait parcourir la littérature scientifique et les annales de conférences pour retrouver toutes les sources du TeV.

catalogue TeVCat comprend 275 sources de rayons gamma dont les positions sont montrées à la Figure 60 :

Consciente de cette ressource manquante pour l'astronomie du TeV, Deirdre Horan a créé TeVCat²⁶ en 2006 en collaboration avec le professeur S. P. Wakely de l'Université de Chicago. Nous avons présenté notre site Web au monde scientifique lors de l'*International Conference on Cosmic Rays* à Mérida à l'été 2007 et l'avons tenu à jour depuis lors en ajoutant toute nouvelle source découverte et autant d'informations sur chacune de ces sources que nous avons le temps de nous procurer et de publier en ligne. Nous avons à ce jour 747 références dans la littérature et bien d'autres dans les présentations (le plus souvent via un lien vers le site Web)²⁷. Actuellement, le

²⁶ Horan D, Wakely S. TeVCat: An Online Catalog for TeV Astronomy. *Headache*. 2008 ; 10: 41.06.

²⁷ <http://TeVcat2.uchicago.edu/>

3.5 Activités multidisciplinaires

3.5.1 Contexte et objectifs

Les technologies mises en œuvre au LLR trouvent des applications dans diverses disciplines. Le développement de détecteurs innovants pour le profilage de faisceau en hadron-thérapie ou la caractérisation de faisceau de particules produites par interaction laser-plasma et l'application de technologies informatiques pour la médiation scientifique sont particulièrement adaptés à l'expertise du LLR.

Le projet PEPITES (ProfilEUR Pour Ions Thérapeutiques à Electrons Secondaires) pour l'hadron-thérapie a été initié en 2012 suite à des contacts avec la société IBA, leader mondial en machines pour protonthérapie, qui souhaitait faire évoluer ses moniteurs vers une meilleure tenue aux radiations sous la contrainte d'un budget matière de moins de 15 μm équivalent eau (WET). Un accord de confidentialité avait été signé pour la période 2013–2015 (avec clause de confidentialité courant 5 ans après la fin de cet accord). Le LLR et IBA avaient échangé sur les besoins en termes de monitoring de faisceau de protons thérapeutique et sur les solutions envisagées par le LLR. Ces échanges n'ont pas donné lieu à développements conjoints, mais le LLR a poursuivi ses R&D sur l'approche qu'il avait identifiée d'un moniteur à émission d'électrons secondaires (SEE). Les atouts de la SEE sont la très faible quantité de matière nécessaire pour générer un signal (10 nm de métal suffisent) et sa très grande linéarité. La zone sensible consiste en une membrane de polyimide, matériau connu pour sa résistance aux radiations, de 1.5 μm d'épaisseur sur laquelle sont déposées 32 pistes d'or de 50nm d'épaisseur, épaisseur assurant l'émission des électrons et la conduction électrique de la piste. Un plan uniformément métallisé en regard permet la collection des charges. Le système est doublé

de façon à échantillonner le profil du faisceau selon X et Y. L'ensemble représente 10 μm WET. La période 2015 – 2017 a permis l'obtention de preuves de principe, avec financement sur fonds propres LLR. A cette période l'équipe du LLR a noué des contacts avec *L'Accélérateur pour la Recherche en Radiochimie et Oncologie à Nantes-Atlantique (ARRONAX)* à St Herblain, et le Département d'Électronique des Détecteurs et d'Informatique pour la Physique (DEDIP) du CEA à Saclay.

L'accélération de particules par interaction laser-plasma intéresse le domaine de la physique des particules et le LLR depuis plusieurs décennies. Ces accélérateurs de particules à base de plasma, pilotés par des lasers ou des faisceaux de particules offrent la promesse de structures d'accélération compactes principalement en raison des champs électriques extrêmement élevés soutenus par le mouvement collectif des électrons du plasma et qu'ils peuvent supporter, typiquement mille fois supérieurs à ceux des accélérateurs conventionnels. Au LLR, le Groupe d'Accélération par Laser et Ondes Plasma (GALOP) s'intéresse à cette technique d'accélération de particules par champ de sillage du plasma et a apporté de nombreuses contributions originales depuis près de 15 ans. Le groupe s'organise désormais autour de 3 axes, le développement de diagnostic faisceau avec la construction de détecteurs et d'aimants permanents, la simulation des interactions laser-plasma relativistes, et les programmes nationaux et européens de futurs accélérateurs.

L'attractivité de nos domaines de recherche fondamentale sur l'origine et la nature de la matière et des interactions fondamentales ou le récit du cosmos contribue de manière significative à attirer des jeunes à la science en général. Une action originale de médiation scientifique a été mise en place à l'initiative d'un physicien du LLR : la création d'une Chaire *Science et Jeu Vidéo (ScienceXGames)*

grâce à un mécénat de Ubisoft, soutenu par l'École polytechnique et sa fondation, et hébergée au LLR.

Les effectifs

Le **groupe PEPITES pour les applications biomédicales** dirigé par Marc Verderi comprenait 2 permanents, 1 post-doctorant et 1 CDD ingénieur dédié au 31 décembre 2023 :

- Permanents : Christophe **Thiebaut** et Marc **Verderi**
- **Post-doctorants** : Alexandre Esper.
- **Ingénieur de recherche** : Christopher Larran.

3.5.2 Instrumentation dans le biomédical : PEPITES

Revue des contributions et résultats scientifiques

Le projet PEPITES, remonte à 2012, suite à des échanges avec la société IBA qui ont motivé l'équipe biomédicale du LLR à développer un moniteur de faisceau ultramince (<15 μm WET = *Water Equivalent Thickness*) et résistant aux radiations. L'idée d'un moniteur à électrons secondaires, construit avec des méthodes du domaine des "Couches Minces", a vu le jour autour de 2014, suivie de l'obtention de diverses preuves de principe tant sur la construction que sur la détection dans la période 2014 – 2016.

Le projet PEPITES a bénéficié à partir de l'été 2017 d'un financement ANR

obtenu pour 3 ans, avec le consortium LLR (porteur projet), CEA/DEDIP (électronique bas-bruit), ARRONAX (site hôte du moniteur et études d'endommagement sous irradiation). Un second support de 2 ans obtenu via le LabEx P2IO a permis le financement des heures de faisceau (coupé dans le projet ANR). Le projet ANR a été prolongé une première fois de 15 mois, afin de porter le développement de l'ASIC dédié vers une autre technologie (CMOS \times -FAB 180 nm), celle envisagée au départ (CMOS Austria Micro System (AMS) 350nm) n'étant plus disponible alors ; puis une seconde fois de 6 mois pour raison de pandémie. La période 2018 – 2022 a été consacrée à la réalisation du projet ANR PEPITES, la période post-ANR, 2022 – 2023 a vu l'émergence de 3 nouveaux axes de recherches autour de PEPITES.

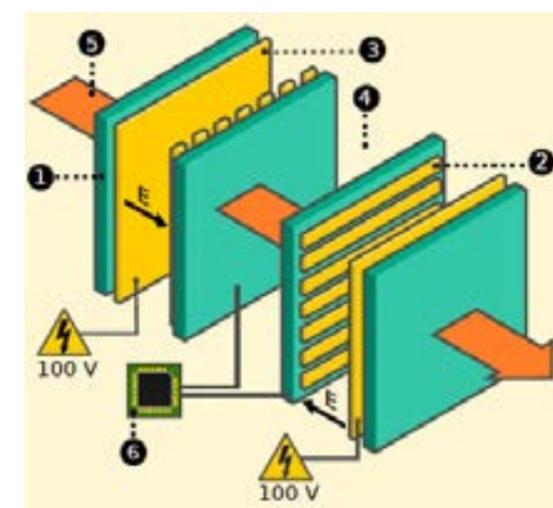
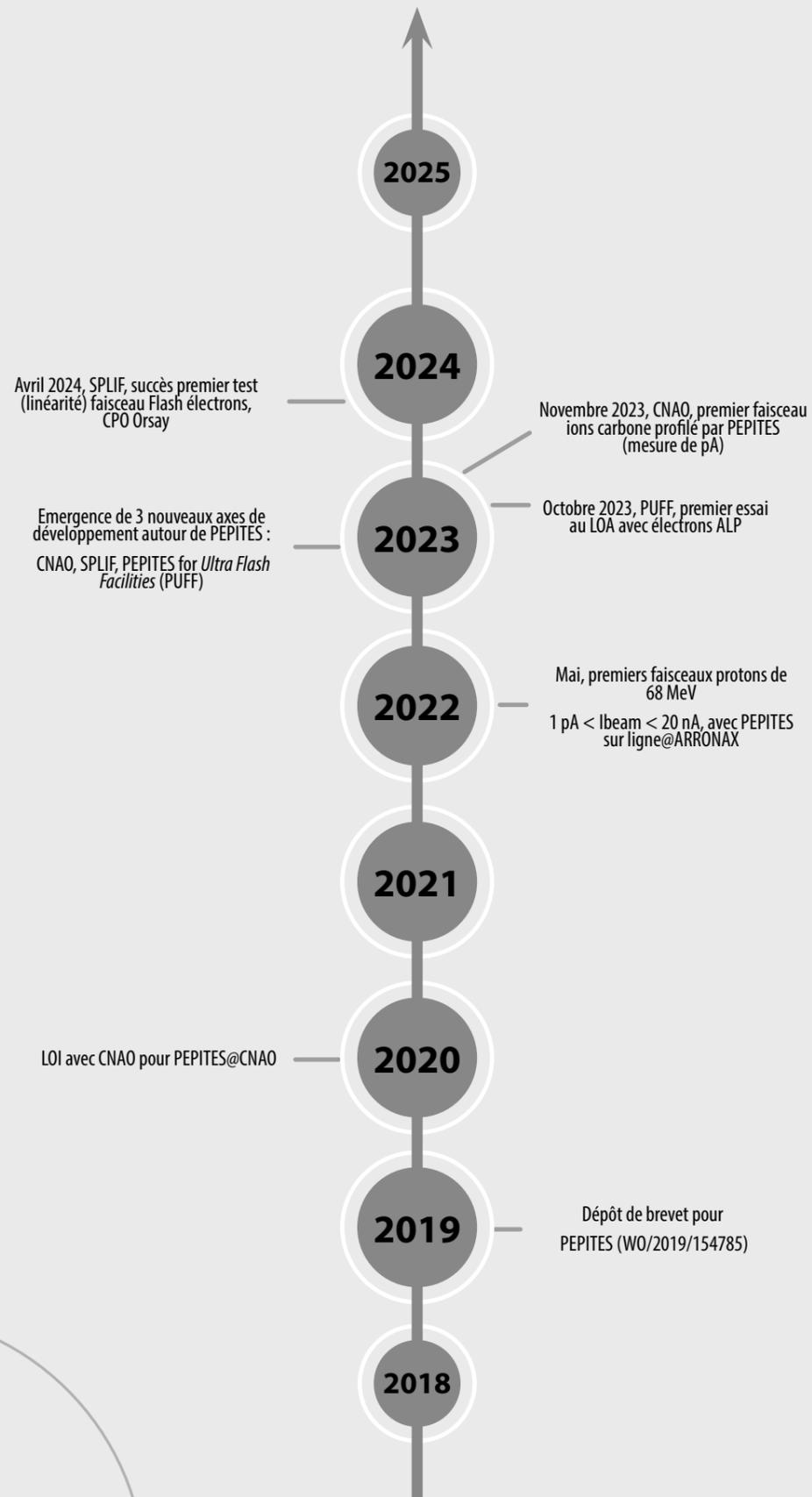


Figure 61 : Schéma de principe de PEPITES : des pistes d'or 2 de 50 nm d'épaisseur, supportées par un film mince (1.5 μm) 1 permettent d'échantillonner le faisceau 5. Il y a deux plans de pistes horizontales et verticales, afin de mesurer le faisceau dans les deux dimensions. Les pistes, traversées par le faisceau, émettent les électrons secondaires, chaque piste est lue par une électronique 6. Les électrons sont collectés par les anodes 3 (0(+100 V)). L'ensemble opère dans le vide 4.

PEPITES : DATES CLEFS



La (Figure 61) montre un schéma de principe du fonctionnement de PEPITES.

Un prototype complet (Figure 62), conçu pour faisceaux continus de 1 pA à 10 nA, a été installé en mai 2022 à ARRONAX (Figure 63) et est toujours

en opération, ce qui permet un retour d'expérience. Un brevet a été déposé en 2018, et publié en 2019; il est en cours d'instruction à l'international. Le LLR a apporté son soutien à ce projet en termes de mécanique, électronique



Figure 62 : Prototype du profileur de faisceau PEPITES monté sur son support avec sa zone sensible (en or). La photographie montre la réalisation de la zone sensible, montée sur son support. Celle-ci comporte 2×32 voies. Le WET de cet ensemble est de $10 \mu\text{m}$. On remarque, en haut à droite du bloc, les nappes de câbles partant de la zone sensible et rejoignant la bride refermant le système en courant sous un fin grillage. Cette connexion de très haute qualité permet de transporter des courants aussi bas que le fA. On voit également les deux câbles épais pour amener les tensions.

(carte d'accueil ASIC et connectique bas-bruit) et informatique. Nous avons de plus bénéficié de l'expertise du LPICM de l'École polytechnique pour réaliser les dépôts d'or des zones sensibles. Le LSI de l'École polytechnique nous a permis de réaliser des tests en faisceau d'électrons montrant que la tenue aux radiations des plans correspond à ~ 10 ans de fonctionnement en thérapie. Au CSNSM, nous avons en particulier irradié les plans avec le maximum de dose à l'interface polyimide – or, sans observer de délamination.

Depuis la fin du projet ANR, 3 nouveaux axes de développement se sont créés autour de PEPITES :

- CNAO : le centre de traitement en proton- et carbone-thérapie, à Pavie, en Italie, souhaite s'équiper d'un moniteur à 6.5 m du patient, fonctionnant en continu pendant l'irradiation. L'approche PEPITES pourrait répondre à leur besoin, en réduisant la quantité de matière. Nous avons diverses options à explorer nous permettant de descendre aussi bas que $0.6 \mu\text{m}$ WET. Ce



Figure 63 : La photographie montre le système monté sur la ligne AX3 à ARRONAX. Le bloc avec les hublots est l'enceinte à vide recevant la zone sensible (que l'on aperçoit au travers de ce hublot) lorsque le moniteur est en prise de données, avec la zone sensible sur l'axe du faisceau. L'ensemble est monté sur un translatrice, dont on voit le soufflet au-dessus de l'enceinte à vide. Au-dessus du soufflet se trouve la bride de fermeture qui reçoit le coffre d'électronique de lecture (grand bloc vertical). Celle-ci est basée sur un ASIC dédié, bas-bruit et de grande gamme dynamique, conçu et réalisé par notre partenaire CEA/DEDIP. Nos études de tenues aux radiations estiment à plusieurs années le fonctionnement de PEPITES en thérapie.

développement fait l'objet d'un accord spécifique CNRS-CNAO, en cours de signature.

- SPLIF : mesurer l'intensité des faisceaux aussi bien continus que FLASH avec un même appareil est un besoin apparu avec les recherches sur la FLASH. SPLIF vise à développer un petit moniteur portatif, basé sur l'émission d'électrons secondaires, sans segmentation. Le projet bénéficie d'un financement pré-maturation de l'IPP.
- UltraFlash : les techniques d'accélération laser-plasma produisent des faisceaux ultra-brefs de l'ordre de 10 fs pour lesquels les questions de saturation de moniteur sont très aiguës. Un projet MITI, conjoint avec le LOA, et très exploratoire, se propose d'étudier la viabilité de l'approche PEPITES pour ces faisceaux.

La publication <https://doi.org/10.18429/JACoW-IBIC2022-MOP21> est la plus significative des publications PEPITES, car elle a été faite en fin de projet ANR. Elle rapporte les résultats montrés plus haut, mais sans les aspects FLASH.

Indépendamment, la période de développement ANR de PEPITES a été

marquée par l'explosion des recherches en thérapie flash. Cette nouvelle modalité consiste en la délivrance de la dose thérapeutique en une fraction de seconde, ce qui préserve bien mieux les tissus sains que l'irradiation conventionnelle, longue de plusieurs minutes, tout en étant aussi efficace sur la tumeur. Les mécanismes biologiques à l'œuvre sont incompris à ce jour et objet d'intenses recherches. Cette modalité, basée sur des faisceaux très intenses, met à mal les moniteurs existants ; les chambres à ionisation, par exemple, souffrent de problèmes de saturation. Grâce à son signal de SEE, PEPITES fonctionne en mode FLASH, ce que nous avons montré à ARRONAX. Lors de rencontres en conférences, la mesure de la dose en conventionnel et en FLASH, avec le même appareil, nous est apparue comme un besoin récurrent pour les études en biologie. Nous nous sommes engagés sur un projet de pré-maturation de l'IPP, avec le moniteur SPLIF : il s'agit d'un système portatif, sans segmentation, avec simplement deux plans métallisés se faisant face, utilisant le signal de SEE, et donc capable de mesurer les doses en conventionnel et en FLASH. Des tests en

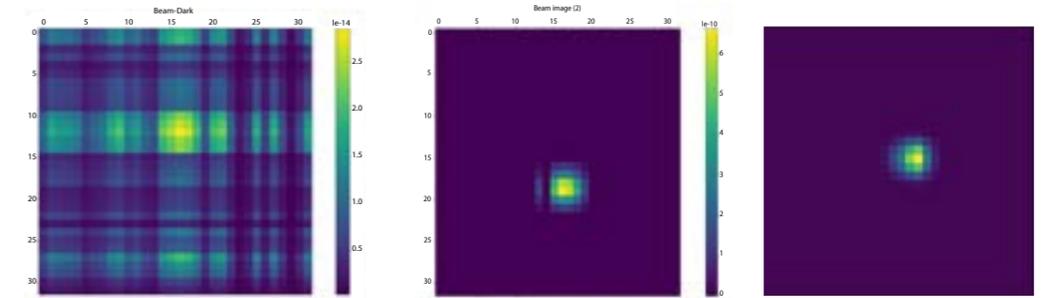


Figure 64 : Reconstruction de l'image du faisceau pour des faisceaux de protons de 68 MeV. (a) et (b) correspondent à des faisceaux continus de 1 pA et 20 nA respectivement. (c) est obtenu pour un faisceau FLASH de 10 μ A de durée 10 ms. On note la grande gamme dynamique de fonctionnement.

faisceau sont prévus dans l'année 2024. Un second dépôt de brevet est en cours.

La **Figure 64** montre plusieurs images de faisceaux reconstruites à l'aide des deux profils mesurés. (a) et (b) correspondent à des faisceaux continus de 1 pA et 20 nA, respectivement. Le maximum de (a) est de 35 fA. (c) ouvre des perspectives, car il montre que PEPITES est capable de mesurer des faisceaux FLASH, faisceaux brefs et intenses qui mettent à la peine les moniteurs classiques, les recherches sur cette nouvelle modalité étant en plein essor car elle préserve bien mieux les tissus sains.

PEPITES intéresse le CNAO, Pavie, Italie, et un partenariat CNRS-CNAO est en signature. CNAO souhaite un moniteur fonctionnant à 6.5m du patient, ce qui contraint davantage le budget matière. Nous avons plusieurs options à explorer, capables de nous amener des 10 μ m WET aujourd'hui à 0.6 μ m. Nous avons effectué un premier test en faisceau de carbone en novembre 2023, avec "PEPITES Nomade", copie portative du moniteur à ARRONAX. CNAO pourrait être la première application de PEPITES en clinique.

Nous avons une dernière ligne de développement, plus exploratoire, qui consiste à étudier la faisabilité d'appliquer l'approche PEPITES aux faisceaux générés par accélération laser-plasma. Cette technique, de par sa compacité, est pressentie comme applicable à terme en

hôpital. Les pulses sont ici extrêmement courts, de l'ordre de 30 fs, la capacité du phénomène de SEE à fournir un signal de mesure dans ces conditions extrêmes n'est pas acquise a priori et doit être étudiée expérimentalement. C'est l'objet du projet MITI PEPITES UltraFlash, conjoint LLR – LOA, sur 2 ans, démarré en 2023. En résumé, à ce jour PEPITES c'est donc un moniteur en opération à ARRONAX, deux projets à visée applicative : CNAO avec un moniteur encore plus mince, et SPLIF pour la double modalité FLASH-conventionnel, et enfin un projet exploratoire, UltraFlash pour la faisabilité de la mesure des faisceaux ultra-courts produits par accélération laser-plasma.

3.5.3 Accélération laser-plasma : GALOP

Les effectifs

Le **groupe d'accélération par laser et ondes plasma (GALOP)** dirigé par Arnd Specka comprenait 2 permanents au 31 décembre 2023 :

- Permanents : Arnaud **Beck** et Arnd **Specka**.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Guillaume Bouchard⁽²⁾, Francesco Massimo⁽²⁾, Imene Zemzemi⁽¹⁾

⁽¹⁾Ph.D. ⁽²⁾post-doc

Revue des contributions et résultats scientifiques

L'équipe s'intéresse à l'étude de l'accélération laser-plasma d'électrons (ALP-e) et les objectifs généraux demeurent ceux fixés à l'origine : l'étude et développement des accélérateurs laser-plasma, des outils associés et de ses applications auprès des lasers d'ultra-haute intensité en France et en UE existants et futurs. Le projet comprend le développement de la simulation SMILEI, la conduite de campagnes expérimentales de tests, la R&D concernant l'instrumentation associée et le suivi des projets européens.

Le groupe a contribué à la conception de la salle dite de longue focale de l'installation laser d'ultra-haute intensité APOLLON situé à l'Orme des Merisiers (St Aubin, Essonne, France). A l'origine, cette salle devait être dédiée majoritairement à l'accélération d'électrons et permettre des programmes de recherche pluriannuels et des dispositifs expérimentaux construits de manière incrémentale ce qui présentait un intérêt particulier.

Après une phase de construction d'environ 7 ans, cette installation unique en France est entrée en phase de commissioning (démarrage technique) en 2020. Le groupe GALOP a contribué par des réalisations techniques spécifiques à la mise en place des dispositifs expérimentaux, en particulier ceux servant à la caractérisation des électrons accélérés : des aimants

permanents dipolaires, et des détecteurs d'électrons imageurs fonctionnant sous vide (**Figure 65**).

La première campagne de commissioning (**Figure 66**) a eu lieu en novembre 2020 avec 0.5 PW sur cible de jet de gaz et fut conduite sous la coordination du LLR et a permis de réaliser un bon nombre d'objectifs technologiques : le rodage des procédures laser journalières, la validation du protocole de radioprotection, la démonstration de la répétabilité du laser et du bon fonctionnement des synchronisations.

Les paquets des électrons produits ont été caractérisés à l'aide des diagnostics développés, installés et exploités par GALOP, mais la qualité de faisceau d'électrons observés pâtissait des trop importantes imperfections du laser.

La deuxième campagne de commissioning en avril 2021 avec une cible différente, une cellule de gaz, et après un travail d'amélioration du laser, a permis d'observer des faisceaux d'électrons atteignant occasionnellement 900 MeV. Les premières versions des détecteurs sous vide ont permis une meilleure caractérisation des électrons. Notamment, les fluctuations du "tangage" du faisceau étaient réduites par rapport à la campagne précédente. GALOP a également participé à une troisième campagne sur APOLLON (**Figure 67**), conduite par une équipe britannique à la suite du premier appel à demande de temps faisceau ouvert.

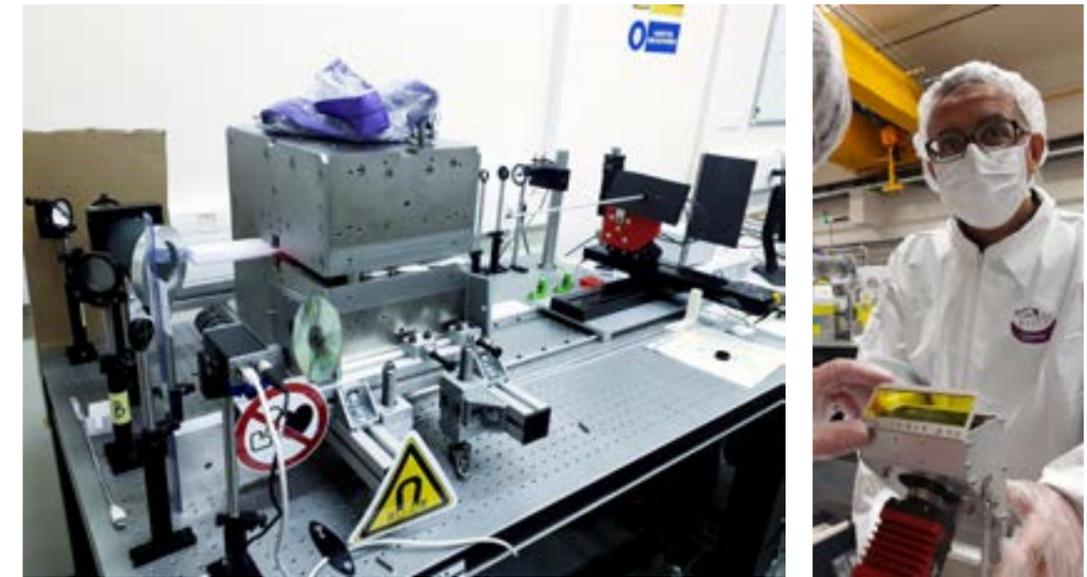


Figure 65 : Gauche : Dipole permanent du spectromètre à électrons conçu par le LLR. Droite : détecteur d'électrons imageur compact fonctionnant sous vide.

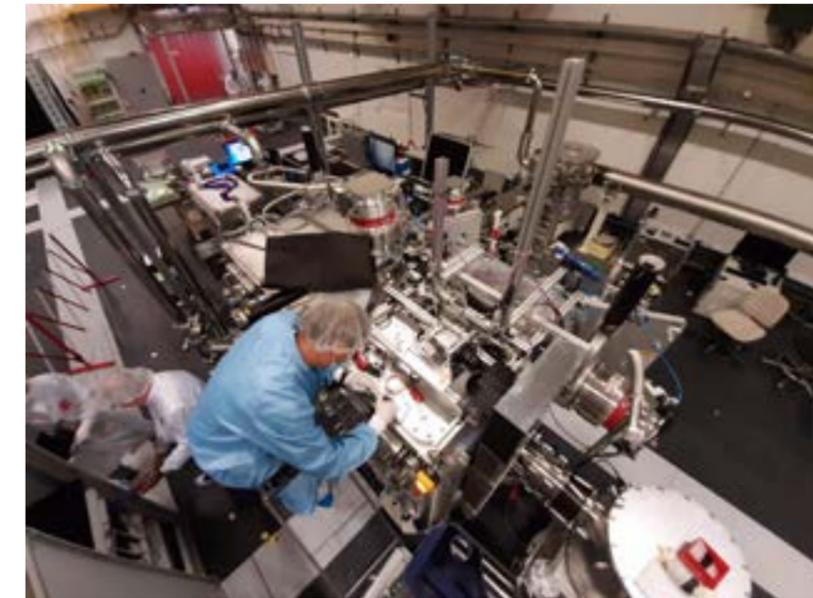


Figure 66 : Préparation des tirs en salle expérimentale "longue focale" du laser APOLLON en conditions de salle propre.



Figure 67 : Spectre énergétique d'électrons (données brutes) observé lors d'un tir APOLLON à 0.5PW sur cible. L'échelle de couleur reflète la densité de charge sur l'écran. L'axe horizontal est l'énergie, l'axe vertical est corrélé à l'angle vertical.

Cette campagne avait comme objectif de qualifier la production de positrons par conversion de paquets intenses obtenus par accélération laser plasma.

Cette campagne a bénéficié des travaux d'amélioration de performance laser et a pu démontrer que sur le laser APOLLON

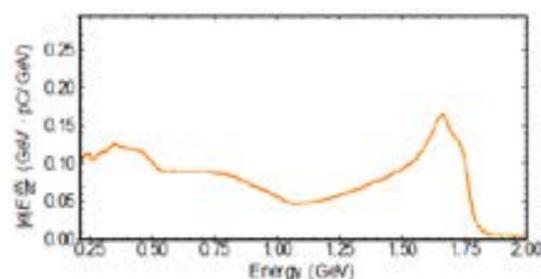


Figure 68 : Spectre de tirs consécutifs sur le laser APOLLON lors d'une période d'excellente stabilité et sans changement de conditions de tir.

on pouvait obtenir des faisceaux d'électrons reproductibles dès lors que le laser lui-même était stable (Figure 68).

Fort de ces réalisations techniques et de son expertise expérimentale et numérique, l'équipe GALOP bénéficie également d'une bonne intégration dans le paysage international. Le groupe participe dès sa genèse au projet EuPRAXIA. Cette collaboration de plus de 40 instituts vise à construire un accélérateur plasma pour les applications, en particulier le laser à électrons libres. EuPRAXIA a été placé sur la feuille de route européenne ESFRI et est actuellement dans sa phase préparatoire. Ainsi, le groupe s'implique dans l'activité simulations et dans le choix du site du pilier laser.

La qualité parfois médiocre des données de ces premières campagnes rend le dépouillement particulièrement difficile et peu fertile. Elles ont néanmoins conduit à une publication sur un diagnostic de rayons gamma qui sont produits de manière concomitante¹.

¹ *Gamma spectrometer results: Experimental characterization of a single-shot spectrometer for high-flux, GeV-scale gamma-ray beams, Cavanagh, N., et al. Physical Review Research. 5, 9 p., 043046.*

Dans la perspective de contribuer dans l'avenir à des campagnes expérimentales, le LLR a commencé à développer une compétence technique nouvelle : la conception, construction et caractérisation d'aimant quadripolaires pour la capture et focalisation des paquets de particules issus de l'accélération laser-plasma. En effet, ceux-ci possèdent une forte divergence angulaire bien que leur émittance peut approcher celles des accélérateurs conventionnels.

Depuis 2020, GALOP (Figure 69) a construit un triplet de quadripôles permanent pour la capture d'une conception originale nécessitant l'invention et la mise en place de techniques de fabrication spécifiques. La caractérisation de ce prototype de construction sur le banc test, également conçu et réalisé entièrement au LLR s'est avérée encourageante au point de pouvoir envisager l'emploi de ce prototype dans une future expérience.

Le groupe GALOP a participé à la création en 2013 du logiciel de simulation SMILEI pour l'accélération de particules laser-plasma. Le logiciel est en accès libre depuis 2018. Cela fait de la période 2018 – 2023 une période charnière de la vie de ce logiciel qui a vu une explosion de sa communauté d'utilisateurs et de ses fonctionnalités. C'est un code de type Particle-In-Cell (PIC) qui résout le système d'équations couplées Maxwell-Vlasov pour simuler les plasmas au niveau cinétique dans des conditions extrêmes et hors équilibres. Il s'applique donc à des systèmes très variés allant de plasmas astrophysiques (vent solaire, environnement cométaire, magnétopause, etc.) aux plasmas de laboratoire créés par laser. Le LLR joue un rôle central dans le management global du développement du logiciel, sa validation mais aussi dans la communication, l'échange avec la communauté d'utilisateurs et la formation.

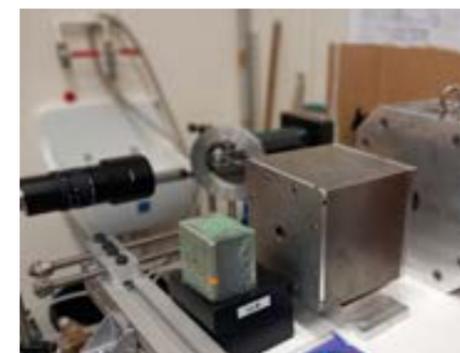
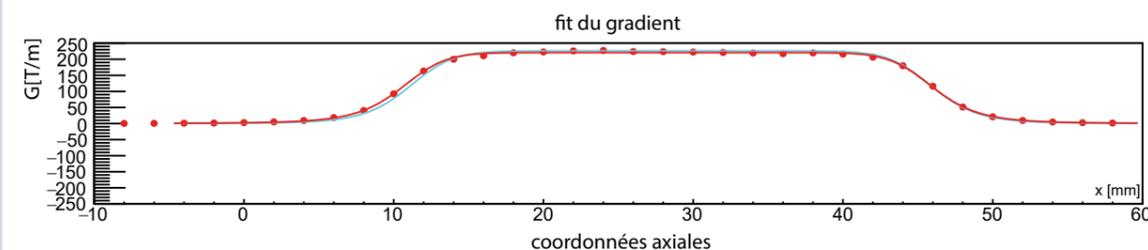


Figure 69 : Gauche : Triplet de capture formé d'aimants quadripolaires permanents construits au LLR. en bas : profil de gradient du premier des 3 quadripôles.



En ce qui concerne le développement, le LLR est notamment en charge de l'implémentation de toutes les fonctionnalités relatives à la simulation d'accélération d'électrons dans les accélérateurs plasma. Ce domaine représente environ la moitié des plus de 400 articles référencés qui citent déjà le code. Il fait l'objet d'un travail technique, mais aussi de recherche et fait l'objet de publications.

La thèse d'Imene Zemzemi (2017 – 2020) a introduit dans le code la géométrie cylindrique avec décomposition en modes de Fourier azimutaux qui est la géométrie la plus utilisée dans le domaine. Elle a aussi porté la réflexion sur l'introduction de solveurs spectraux pour cette géométrie. Ces solveurs présentent l'avantage de minimiser la dispersion numérique et donc certains artefacts pouvant dégrader les résultats. Ce travail a été fait en collaboration proche avec le Lawrence Berkeley National Lab très actif sur le sujet. Le post-doctorant Francesco Massimo (2018 – 2020) a implémenté dans SMILEI un modèle d'enveloppe pour une simulation des lasers moins coûteuse. Il a également proposé une méthode de simulation d'ionisation dans le cadre de cette approximation. Le post-doctorant Guillaume Bouchard (2020 – 2022) a développé des conditions aux bords

extrêmement performantes permettant de réduire la taille des simulations tout en améliorant leurs précisions y compris, et pour la première fois, dans le cadre de l'approximation d'enveloppe pour le laser.

Le LLR coordonne également des efforts pour les performances du code en collaboration intime avec la Maison de la Simulation. SMILEI a ainsi été pionnier dans le domaine de l'équilibrage dynamique de charge pour les simulations PIC massivement parallèles et dans l'utilisation d'instructions SIMD. Plus récemment, SMILEI a également été porté sur les GPU NVIDIA et AMD à l'aide des technologies openMP, openACC et Cuda. Cette version 5.0 a été partagée en novembre 2023. L'objectif de l'équipe est, via ces travaux d'optimisations algorithmiques et de performance, de réduire autant que possible le coût énergétique des simulations qui est désormais quasi systématiquement mesuré.

Enfin, le LLR administre le cluster de calcul "3 Lab computing" et coordonne sa communauté d'utilisateurs. Il sert au développement de SMILEI et exécute également toute la suite logicielle nécessaire aux tests d'intégration continue du code sur CPU. Ces tests sont

devenus d'une importance capitale. Suite à l'expansion très rapide de la taille du code, sa bonne maintenance et sa non-régression sont devenues la première préoccupation des développeurs.

3.5.4 Science & Jeu vidéo

Revue des contributions et résultats scientifiques

Suite à l'ERC Consolidating Grant (2009 – 2014) avec laquelle il a initié au laboratoire la composante "ions lourds" du programme de CMS, Raphaël Granier de Cassagnac a déposé un premier projet de jeu vidéo sur la physique des particules à l'appel *proof-of-concept* qui s'ouvrait alors à lui. Si ce financement n'a pas été obtenu, l'idée était là, et d'autres sources sont venues l'initier (LabEx P2IO, prématuration Paris-Saclay, fonds propres du laboratoire). Un prototype a été conçu en 2018, et plusieurs façons de continuer cette aventure ont été envisagées. La plus fructueuse fut que la société Ubisoft a été convaincue de financer une chaire de mécénat sur le thème large des liens entre les sciences (toutes, y compris humaines et sociales) et les jeux vidéo. Le cœur de la chaire consistait en la création

d'une équipe de professionnels du jeu, : le "gamelab", en résidence dans notre centre de recherche pluridisciplinaire. Son noyau dur était constitué d'un développeur (sur le moteur Unity), d'un *game designer*, d'un graphiste et d'une cheffe de projet ; l'ont renforcé un second développeur et deux UX designers successifs (en apprentissage ou stage puis CDD).

Les activités de la chaire (2019 – 23) se sont déclinées sur trois axes :

- Enseignement : Former et amener des ingénieurs aux industries vidéoludiques.
- Recherche : Mettre de plus en plus de sciences dans les jeux vidéo.
- Vulgarisation : Utiliser le jeu vidéo pour démocratiser les sciences.

Sur le volet a) Enseignement : L'École nationale des jeux et médias interactifs numériques (l'ENJMIN affiliée au CNAM) a été ajoutée, à notre initiative, au catalogue officiel des écoles d'applications de Polytechnique et jusqu'à 3 personnes s'y inscrivent maintenant chaque année. Par ailleurs, un cours pratique (modal) de conception de jeux vidéo a été créé, de même qu'un cours d'intelligence artificielle pour le jeu vidéo (et donc

caustiques ou du transfert thermique à la surface d'objets 3D, à l'utilisation du jeu pour le diagnostic des troubles de l'attention, en passant par la conception de jeux pour le climat ou l'usage de l'intelligence artificielle pour créer des dialogues ou des comportements... Sur les quatre premières années, trois prix de meilleur projet ont été obtenus, dont un en physique. Deux communications en conférences et un article ont été soumis et acceptés. Par ailleurs, une thèse, non prévue initialement, a été financée par la chaire. Chloé Vigneau étudie l'acquisition de compétences par la création de jeux vidéo, se fondant sur des ateliers en milieu scolaire et propose un moteur de jeu dédié à l'apprentissage. La thèse a fait l'objet de plusieurs communications en conférence et a été soutenue le 3 juillet 2024.

À cheval entre la recherche et la communication, nous avons organisé trois colloques pour susciter des rencontres fructueuses entre chercheurs et industriels vidéoludiques. Le dernier (été 2022) avait pour ambition d'explorer les liens entre la cause environnementale et les jeux vidéo. Les présentations de nos colloques sont disponibles sur notre chaîne YouTube : <https://www.youtube.com/@sciencegames> (bientôt 10 000 vues et 1 000 heures de visionnage). Des événements de plus petites envergures ont également été co-organisés : une journée "jeux et intelligence artificielle", une scientific game jam, un atelier sur l'usage du jeu vidéo dans l'éducation... Différents membres de l'équipe ont été maintes fois invités à s'exprimer sur divers sujets, liste complète : <https://sciencegames.fr/evenements/>.

Si les deux premiers volets ci-dessus sont extrêmement pluridisciplinaires, nous nous sommes concentrés sur la science du LLR pour le volet c) Vulgarisation. Tout au long du projet, nous avons créé un jeu vidéo dans l'optique de populariser la physique des particules sur une audience large et pas forcément intéressée par les sciences : les *gamers*. Notre jeu,

Exographer (**Figure 70**) (initialement nommé *Reveal*) sortira en 2024.

Exographer a été intégralement conçu au laboratoire par une équipe interdisciplinaire, sous la houlette de Raphaël Granier de Cassagnac. Il s'agit d'une des nombreuses réalisations de la chaire "Science et Jeu vidéo" qu'il a fondée à l'École polytechnique en 2019, grâce au mécénat de la société Ubisoft.

Terminé du point de vue de la chaire, *Exographer* fait l'objet : d'un dépôt logiciel Polytechnique/CNRS, d'une licence d'exploitation exclusive cédée au *spin-off* de la chaire (voir ci-dessous), et d'un contrat d'édition avec l'éditeur *Abylight*. Il sera disponible sur PC et consoles (*switch, playstations et xbox*) et en une dizaine de langues. Le jeu devrait sortir à l'automne 2024 (**Figure 71**). Il est aujourd'hui annoncé sur une plateforme *Steam*. Il apportera une grande visibilité sur les disciplines du LLR et de l'IN2P3, ainsi que des ressources propres.

La chaire a terminé le 31 décembre 2023 (prolongée jusqu'au 31 décembre 2024 mais sans nouvel apport financier). Pour la suite, ses activités se déploient selon trois perspectives :

- La création à l'Institut polytechnique de Paris du centre interdisciplinaire "Sciences, Publics, Imaginations, Recherches, Arts, tous Liés !" ou SPIRAL dont le périmètre est plus large que le jeu vidéo mais qui est aujourd'hui dirigé par Raphaël Granier de Cassagnac
- La création d'un *spin-off* de la chaire, *SciFunGames*, entreprise de valorisation scientifique, que préside Raphaël, au titre de l'article 25.1 du code de la recherche.
- La mutation de la chaire en une chaire multi-industrielle, coordonnée par Catherine Rolland.

3.5.5 La simulation dans un monde ouvert : GEANT4 et SMILEI

GEANT4

Geant4, qui fêtera son 30^e anniversaire

Les effectifs

La **Chaire Science & Jeu Vidéo** dirigée par le physicien Raphaël Granier de Cassagnac jusqu'au 31 décembre 2023 a financé pour des durées diverses 7 personnes en contrats à durée déterminée (CDD) et une thèse de doctorat :

- Permanents** : Raphaël **Granier de Cassagnac**.
- CDD** : Léonard Allain-Launay, Arthur Bertaud, Tony Cottrel, Pierre-Alban Ferrer, Catherine Rolland, Thomas Vaulbert, Priscilla Larcher,
- Doctorante** : Chloé Vigneau

multi-agents temps réel).

Sur le volet b) Recherche : une cinquantaine de projets scientifiques collectifs (PSC) ont été suivis. Lors de ces projets, des groupes de 4 à 6 polytechnicien(ne)s travaillent tout au long de l'année. Les sujets sont

extrêmement variés. Les nôtres se sont déployés sur 7 des 10 départements de l'école (informatique, sciences humaines et sociales, mécanique, physique, biologie, maths appliquées, économie...), toujours suivis par un membre du *gamelab*. Les sujets vont de l'implémentation en temps réel de

en 2024, est le logiciel de simulation du transport des particules de hautes énergies dans la matière et interagissant avec celle-ci, qui est devenu le standard de la physique des hautes énergies. Geant4 est également "mission critical" en physique nucléaire, médecine nucléaire – imagerie et thérapie –, ingénierie spatiale – dosimétrie astronaute et électronique embarquée –, micro – et nano-dosimétrie à l'échelle de l'ADN, il est aussi utilisé en sécurité intérieure avec



Figure 70 : Exographer est un jeu vidéo imprégné par la science qui se fait au Laboratoire Leprince-Ringuet : la physique des particules. Un personnage y évolue dans un monde mystérieux et suit les traces d'une civilisation oubliée. Il y répare des machines directement inspirées des nôtres (observatoires cosmiques tels que HESS, accélérateurs de particules géants comme le LHC, détecteurs de neutrinos souterrains comme Kamiokande, ...). Les membres de cette civilisation sont inspirés par de vrais physiciens comme Curie ou Dirac. ... Et le jeu débouche sur une phase d'analyse où le joueur manipule à son insu des diagrammes de Feynman.

la simulation des systèmes de scan dans les aéroports, ou de grands systèmes destinés aux camions et cargos, et trouve plusieurs applications en "muon-graphie" avec imagerie du cœur du réacteur de Fukushima, des chambres magmatiques des volcans, voire en archéologie avec la grande pyramide de Gizeh. Le LLR est impliqué dans Geant4 depuis quasiment le début du projet.

Depuis 2018 a été marquée par deux aspects : la production du modèle 5D de conversion de γ en paires e^+e^- par Denis Bernard et Igor Semeniouk, et le rôle de porte-parole de la collaboration par Marc Verderi.

Le modèle de conversion de γ en paires e^+e^- par Denis Bernard et Igor Semeniouk est un modèle sans approximation, qui prend en compte la polarisation du γ et le



Figure 71 : Trois "screenshots du jeu Exographer" (<https://store.steampowered.com/app/2834320/Exographer/>).

recul du noyau, ce qui induit donc que le γ initial n'est pas nécessairement dans le plan e^+e^- . C'est un modèle valide jusqu'au seuil de production. Le jeu de variables pris en compte amène à une distribution 5D. Ce modèle avait été développé pour les besoins des études de polarimétrie du projet HARPO, car les modèles existants dans Geant4 souffraient d'approximations qui les rendaient impropres à ces études. Afin de servir la communauté d'astronomie gamma, Denis et Igor avaient été encouragés à faire don de leur modèle à Geant4. Ce modèle, G4BetheHeitler5DModel, a été intégré dans la distribution Geant4 depuis décembre 2018 (release 10.5) et est reconnu comme une référence par la collaboration. Il a été étendu à la conversion en paire de muons par la suite. La référence décrivant l'implémentation dans Geant4 est NIM A 936 (2019) 290.

Dans la même période, les développements incrémentaux concernant les méthodes de réduction de variance ont continué, mais à un rythme moindre étant donné la prise de responsabilité au sein de la collaboration. Marc Verderi a en effet été élu porte-parole de Geant4 en avril 2020, puis réélu en 2022 (mandat de 2 ans), après avoir été porte-parole adjoint pendant 10 ans. Le porte-parole préside le "Steering Board", bureau de pilotage de la collaboration, et représente celle-ci à l'"Oversight Board", bureau des agences de financement. Il est également co-organisateur des réunions du "Technical Forum", forum développeurs – utilisateurs, et initiateur des programmes des réunions de collaboration annuelles. Durant cette période, un effort a notamment été initié envers les plus jeunes avec la création du ECRC (Early Career Researchers Committee) avec un représentant au Steering Board, et la création d'une task force sur l'évolution de la collaboration.

L'alerte permanente et récurrente auprès de tout interlocuteur pertinent a été sonnée concernant le risque, voire l'assurance, d'une rupture d'expertise

dans à peu près tous les domaines de Geant4 d'ici moins de 10 ans, à cause du vieillissement de ses membres et d'un taux de renouvellement pérenne bien trop faible, largement pénalisé par les politiques de contrats courts. Bien au-delà de Geant4, cette situation est dangereuse pour tous les utilisateurs du logiciel. Geant4 a répondu à la revue "HL-LHC Computing Review Stage-2: Common Software Projects" dont le but principal était d'assurer que les différentes parties – projets logiciels (Geant4, ROOT, DD4HEP, etc.) et expériences LHC – CMS, ATLAS, LHCb, ALICE – partageaient des attentes communes et réalistes en matière de besoins et de délais. Le cas échéant, cette revue devait aider les expériences à planifier leurs stratégies et aider les projets à se concentrer sur les priorités et à identifier les points de blocage. La présentation de la stratégie de développement de Geant4 ainsi que ses investissements en matière de R&D ont bien été reçus par le panel de revue. Les R&D concernent notamment l'introduction d'AI dans les simulations rapides ou les tentatives de portage, au moins partielles avec la physique électromagnétique, de Geant4 sur GPU. Nous avons particulièrement insisté sur le risque le plus élevé, aussi bien pour Geant4 que ses utilisateurs, qui est le besoin vital d'un renouvellement de génération de développeurs au long cours, afin d'assurer la pérennité des expertises nécessaires, aujourd'hui menacées. Ce message a été entendu et relayé par le panel de revue. Nous espérons que les agences de financement, et le CERN en particulier, prendront les décisions en ce sens. Dans cette même période, nous avons fin 2023, déclenché une évaluation des projets de portage sur GPU de la physique électromagnétique. Deux projets (AdePT, CERN et Celeritas, ORNL & FNAL) étudient ce portage. Le processing flow sur GPU se prête mal au calcul Monte-Carlo de hautes énergies, car il induit nombre de "divergences" ; les bénéfices ne sont pas évidents a priori et doivent donc être étudiés.

Ces projets ont montré que le point de blocage essentiel est aujourd'hui la gestion de la complexité des calculs géométriques –due à la variété des formes nécessaires en simulation HEP– qui entravent le parallélisme des calculs. Une révision des modélisations géométriques est en cours, et une revue-delta est prévue pour décembre 2024. En plus des activités de développement et de gestion, l'équipe LLR est impliquée depuis longtemps dans des tutoriels Geant4, et notamment dans un tutoriel annuel à Orsay, avec d'autres membres IN2P3, depuis 10 ans, dans le cadre de l'école doctorale PHENIICS, et conjointement avec l'ANF (Actions Nationales de Formation) de IN2P3 un an sur deux.

SMILEI

Smilei est un logiciel de simulation pour l'accélération de particules laser-plasma en conditions extrêmes. Le groupe GALOP, qui a participé à la création du logiciel de simulation SMILEI, est un contributeur majeur de l'équipe de développement. Il s'assure notamment que le logiciel reste à la pointe en termes de méthodes numériques et de performances techniques pour la simulation d'accélérateurs plasma sur supercalculateur.

SMILEI a rencontré un grand succès depuis 2018. En témoigne l'augmentation du nombre de citations de l'article de référence du logiciel publié en 2018 (Déroüllat et al., *Comput. Phys. Commun.* 222). Il est cité 15 fois l'année de sa publication, 58 fois en 2020 et 107 fois au cours de l'année 2023 pour un total de citations dépassant 400. La communauté d'utilisateurs se développe rapidement en France et à l'international pour plusieurs raisons. Tout d'abord le code est libre et bien documenté. Il est aussi capable de traiter une très grande variété de plasmas allant des plasmas de laboratoire aux plasmas spatiaux. À titre d'illustration, au CNRS, cinq instituts différents sont utilisateurs du code

dont quatre participent également au développement. Enfin, la communauté des utilisateurs de SMILEI se développant rapidement en France et à l'international, plusieurs outils collaboratifs ont été mis en place pour encourager les échanges. Un workshop international est organisé tous les 18 mois environ à des fins de formation et d'échange de bonnes pratiques. Les derniers en date sont en mars 2019 (Maison de la Simulation, France), mars 2022 (École polytechnique, France), novembre 2023 (ELI, République Tchèque).

Suite aux contributions de GALOP, SMILEI a été pionnier dans l'équilibrage dynamique de charge, l'utilisation du modèle d'enveloppe pour accélérer la simulation de lasers, y compris celles devant rendre compte de phénomènes d'ionisation et l'introduction de faisceaux réalistes dans des géométries à décomposition en modes azimutaux (thèse réalisée au LLR).

GALOP joue aussi un rôle important dans le portage de SMILEI sur architecture GPU. Une version compatible pour GPU AMD et NVIDIA a été rendue publique en novembre 2023. Certaines équipes d'utilisateurs préparent déjà des publications avec des résultats obtenus sur GPU. L'objectif de ces développements numériques et techniques est d'arriver à fournir des simulations en quasi temps-réel et à moindre coût énergétique tout en conservant la fidélité la plus haute possible.

L'ensemble de ces travaux ont valu à l'équipe SMILEI d'être lauréate du prix de la recherche du logiciel libre 2023 dans la catégorie "Science et technique" remis par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (**Figure 72**).

GALOP coordonne également le projet "Virtual Laplace" qui justifie et obtient chaque année des allocations d'heures de calcul dans les grands centres nationaux pour plusieurs laboratoires français travaillant sur l'accélération d'électrons par sillage laser. Le groupe

maintient et gère également le cluster de développement local "3 Lab Computing", partagé entre plusieurs laboratoires de l'École polytechnique qui est la plateforme centrale du développement et de l'intégration continue de SMILEI.

3.5.6 Méthodes d'apprentissage automatique

Les méthodes automatiques d'apprentissage MAA (*Machine Learning* ou *Artificial Intelligence*) trouvent un formidable terrain de jeu avec la physique des particules qui dispose de quantité colossale de données, réelles ou simulées, structurées à diverses échelles, et résultant du passage de particules dans des détecteurs à la géométrie des plus complexes. Le domaine offre aussi une compréhension inégalée

des méthodes de propagations des incertitudes systématiques nécessaires à l'interprétation des résultats de physique.

Les grandes expériences de physique des particules sont des projets d'envergure mondiale avec des coûts d'opération très élevés et les gains en sensibilité ou en efficacité de sélection des événements intéressants sont des enjeux vitaux. Les MAA nous permettent d'être plus efficaces et de produire des recherches de meilleure qualité dans des délais plus courts. Ces méthodes seront au cœur de tous les aspects de nos plans d'expériences dans le futur (conception des détecteurs, simulation, reconstruction, analyse des données) et pourraient faciliter l'accès à des indices plus subtils d'une physique au-



Figure 72 : Cérémonie de remise du prix de la recherche du logiciel libre 2023, dans la catégorie "Science et technique", remis par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

delà du Modèle Standard actuel. Un domaine de l'IA apparemment sans lien, comme le traitement du langage naturel (de puissants modèles de langage à grande échelle comme ChatGPT), aura également un impact considérable sur la collecte d'informations et l'établissement de liens.

Le LLR a mis en place un petit groupe de travail de haut niveau pour des développements innovants dans les domaines des MAA en vue d'applications concrètes pour la sélection et l'analyse des données en physique des particules. L'expérience de physique des hautes énergies CMS avec son nouveau calorimètre haute granularité HGAL et les données de l'expérience de physique des neutrinos SK pour la recherche du fond diffus de neutrinos de supernova serviront de banc de test.

Le laboratoire a déjà obtenu un financement de l'ANR pour la période 2022 – 2027 : le projet OGCID (F.

Magniette et al). Il s'agit de proposer des algorithmes innovants pour l'identification des particules, la régression de leurs paramètres continus et leur segmentation. Il est basé sur la technologie des réseaux de neurones à convolution de graphes, très performante pour ce type de données (**Figure 73**). Le but du projet est de proposer des versions optimisées de ces algorithmes pour les environnements à faibles ressources (gros volume de calcul, électronique de déclenchement, FPGA...). Ces optimisations se basent sur les propriétés géométriques des détecteurs, sur l'optimisation bayésienne et sur la parallélisation. Il est porté par le groupe Machine Learning du LLR en collaboration avec deux groupes de physique : le groupe CMS (physique des hautes énergies) pour l'identification dans les calorimètres ultra-granulaires et le groupe HK (physique des neutrinos) pour la réjection du bruit de fond dans les

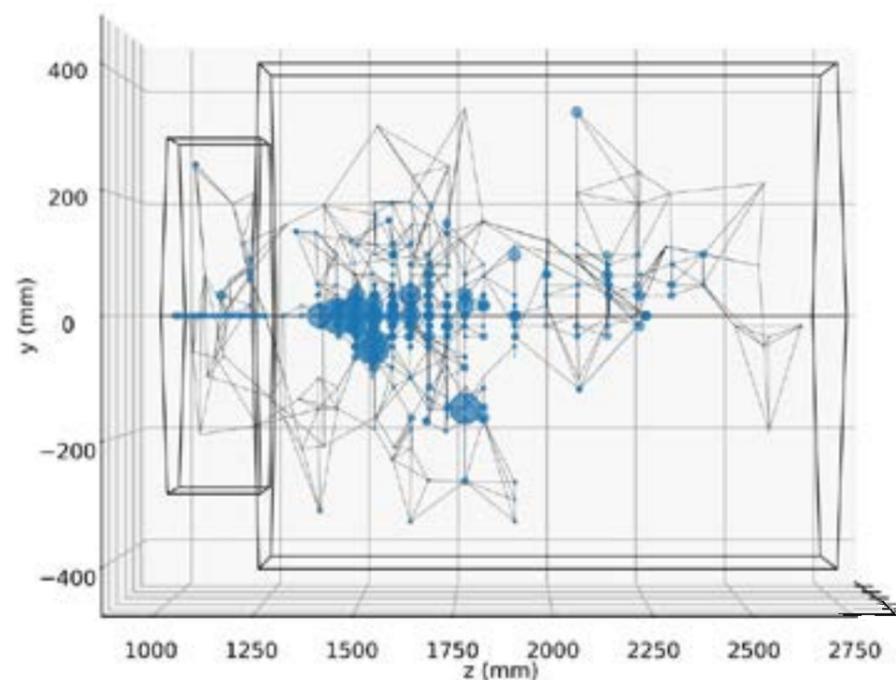


Figure 73 : Simulation du développement d'une gerbe hadronique dans le calorimètre haute granularité HGAL de CMS. L'identification de particules s'appuie sur la technologie des réseaux de neurones à convolution de graphes.

détecteurs à effet Čerenkov.

Ce projet a attiré des stagiaires qui ont su implémenter les différents algorithmes impliqués dans cette problématique, ainsi qu'un framework de comparaison de modèles d'apprentissage MOSAIC. Un article a été soumis pour publication². De nombreuses simulations ont également été produites par le groupe projet, notamment des simulations de calorimètre ultra-granulaire et du futur détecteur de neutrinos HK. Ces simulations sont mises à disposition de la communauté dans l'esprit de l'open-data science.

Le projet a recruté un doctorant en octobre 2023 qui travaille actuellement sur les analyses de performances des différentes options d'implémentation des algorithmes sur les simulations.

² Mattéo Papin, Yann Beaujeault-Taudière et Frédéric Magniette, *A comparison framework for machine learning models* (January 2023) 15 pp. ; <https://arxiv.org/abs/2301.12986>)

Les effectifs :

Le **groupe Mécanique** dirigé par Antoine Cauchois comprenait 11 permanents et 1 apprenti :

- **Permanents** : Marc Anduze⁽¹⁾, Antoine **Cauchois**, Alain **Bonnemaison**, Vira **Davouloury**, Evelyne **Edy**, Oscar **Ferreira**, Hamid **Khaled**, Guillaume **Le Barbu**, Ali **Mahjoub**, Pascal Manigot⁽²⁾, Clément **Massa**, Thomas **Pierre-Émile** et Farid **Saadi**.

⁽¹⁾<04/2021 ⁽²⁾<06/2022

- **Apprenti** : Clément Guivarch.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Ali Fahad, Théophile Visage.

Le groupe **Électronique et Instrumentation** dirigé par Franck Gastaldi comprenait 8 permanents et 1 apprenti :

- **Permanents** : Florence **Beaujean**, Rémi **Duhamel**, Franck **Gastaldi**, Yannick *Geerebaert*⁽¹⁾, Rémi **Guillaumat**, Olivier **le Dortz**, Marc **Louzir**, Jérôme **Nanni**, Axel **Roellinger** et *Thierry Romanteau*⁽²⁾.

⁽¹⁾<06/2021 ⁽²⁾< 06/2022

- **Apprenti** : Chérif Benfetima, Thibault Dos Santos⁽³⁾.

⁽³⁾<09/2021

Le **groupe Informatique** dirigé par Frédéric Magniette comprenait 11 permanents et 2 doctorants ou post-doctorants :

- **Permanents** : Emilia **Becheva**, Arnaud **Beck**, Lorenzo **Bernardi**, Arnaud **Chiron**, Léo **Eychenne**, Anne **Garcia**, Shamik **Ghosh**, Gilles Grasseau⁽¹⁾, Michel **Lastes**, Frédéric **Magniette**, Michael **Mellin**, Andrea Sartirana⁽²⁾, Igor **Semeniouk**.

⁽¹⁾<05/2020 ⁽²⁾< 01/2022

- **Post-doctorant** : Yann Beaujeault-Taudière.

- **Doctorant** : Matthieu Melennec.

Autres personnes impliquées au cours de la période de référence :

Walid Daoud, Artur Valiente.

gestion globale du projet mécanique, et d'autre part de concevoir la mécanique des détecteurs de physique. Pour cela, l'ingénieur dispose de deux outils informatiques essentiels, Catia V6 (3D Expérience) pour la conception mécanique et Ansys WorkBench pour les calculs éléments finis. Le pôle atelier est composé de 3 personnes. L'atelier de fabrication a en charge la réalisation des outillages et prototypes destinés aux détecteurs de physique. Il dispose d'un parc machine exceptionnel par sa

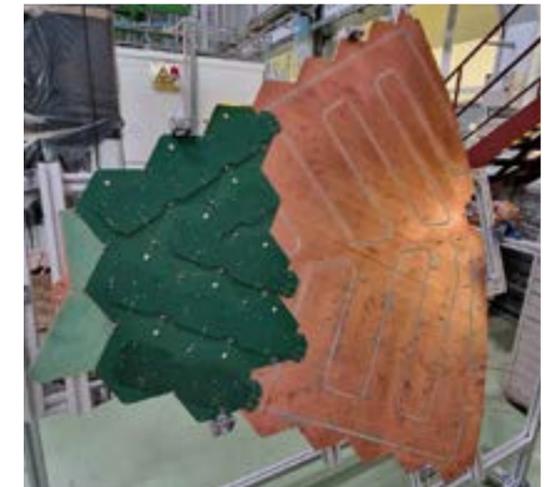
modernité et son niveau de technologie. Une grande partie de nos machines a été renouvelée et mise à niveau durant les 5 dernières années, attestant de notre volonté de pouvoir répondre aux développements des dernières générations de détecteurs de physique et de conserver une position visible à l'international. Le pôle atelier dispose aussi d'un hall de montage permettant l'assemblage des détecteurs et leurs outillages. Enfin, le pôle service général est quant à lui composé d'une personne

en charge de la logistique, des transports de matériels sensibles, de la gestion des chantiers de travaux internes et de la gestion des stocks et approvisionnement du magasin interne.

Le savoir-faire du groupe mécanique s'appuie sur de solides bases en conception de grands instruments, conception et réalisation de prototypes physiques et technologiques. Le lien intime qui existe entre les différents corps de métiers des personnels mécaniciens au sein du groupe est l'un des atouts de la cohésion du groupe et de la réussite des projets. La proximité du bureau d'études et de l'atelier de fabrication permet d'arriver de façon performante à des ensembles mécaniques optimisés, en un minimum de temps. Le groupe se démarque aussi par son expertise en calculs par éléments finis, dans des domaines variés allant de la statique

linéaire et non linéaire, les études vibratoires et sismiques, aux matériaux spécifiques comme le composite. Le groupe est d'ailleurs reconnu pour sa capacité à concevoir et réaliser des structures en matériaux composites avec l'aide de son autoclave.

Le groupe est particulièrement investi ces dernières années dans les Upgrades de CMS dans le projet HGCAL. Pour faire face à ces implications et responsabilités, le laboratoire a bénéficié de fonds d'investissement TGI (Très Grands Instruments). L'achat de plusieurs machines numériques, dont une fraiseuse grande dimension, un tour 5 axes bi-broche et une machine à mesurer tridimensionnelle, a considérablement augmenté ses capacités de réalisation. Ces machines, pilotées par des techniciens de très haut niveau, font probablement de l'atelier du LLR l'un des plus performants



au CNRS. L'évolution de l'école polytechnique passe par la construction de bâtiments neufs pour le LLR, avec dans un premier temps la construction d'un bâtiment qui hébergera son atelier en 2027. Le responsable du groupe a défini les futurs besoins en termes de surfaces, d'organisation et infrastructures nécessaires pour ces futurs espaces, en collaboration étroite avec l'école polytechnique et cabinets en charge du dossier. Ainsi, après avoir terminé toutes les productions majeures pour le calorimètre HGAL de CMS, le groupe mécanique déménagera dans un nouvel atelier moderne et optimal, contribuant davantage à le rendre performant.

ÉLECTRONIQUE ET INSTRUMENTATION

Le groupe d'électronique et d'instrumentation se compose de 6 Ingénieurs de Recherche (IR) dont 1 en contrat à durée indéterminée (CDI-X), 2 Assistants Ingénieur (AI) et un apprenti ingénieur. Les activités du groupe englobent un large éventail de disciplines, allant de la conception matérielle d'électronique numérique au développement logiciel pour l'acquisition et le traitement de données, ainsi qu'au contrôle et à la commande des systèmes. Nous étudions, concevons et réalisons des systèmes électroniques spécifiques pour les projets auxquels participent les équipes de recherche du laboratoire, en collaboration nationale ou internationale. 4 recrutements dont un apprenti nous ont été accordés en 2023 et nous permettent à nouveau de retrouver un effectif pouvant répondre correctement aux besoins de la physique. Cependant, notre structuration implique que les tâches de maintenance qui pouvaient être prises en charge par des techniciens le sont maintenant par les concepteurs de projets. Ceci signifie que certaines de ces tâches peuvent être confiées à la sous-traitance, générant ainsi des coûts supplémentaires qu'il faut donc prévoir à l'avance dans le financement des projets.

Le groupe étant constitué majoritairement

d'IR, notre implication se traduit souvent par la prise de responsabilité complète de projets ou sous projets. Ceci couvre un large domaine allant de la définition des fonctionnalités d'un système et des choix technologiques associés en concertation avec les groupes de physique, jusqu'à l'installation et la mise en route de ces systèmes au sein des expériences.

Le groupe travaille en collaboration avec le groupe "on-line" du groupe informatique du laboratoire composé de 2 ingénieurs de recherche dont 1 en contrat à durée indéterminée (CDI-X). Ce personnel est fonctionnellement rattaché au groupe électronique. L'objectif est de mettre en œuvre une approche combinée du développement matériel et logiciel des systèmes pour les détecteurs de physique. Grâce à cela, nous avons développé des bancs d'essai pour la lecture de détecteurs et assuré le contrôle-commande via des électroniques périphériques. Cette expertise a permis au groupe "on-line" de mettre en place un environnement logiciel complet dédié à l'acquisition et au contrôle, aujourd'hui distribué et utilisé dans des projets ou collaborations nationaux et internationaux.

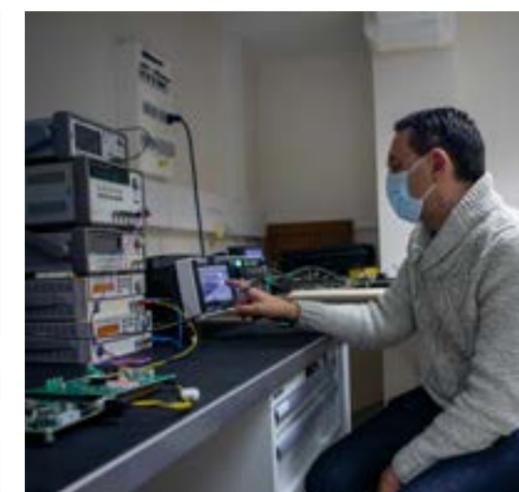
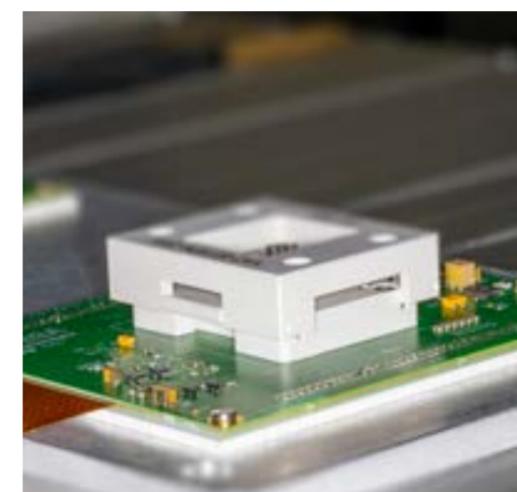
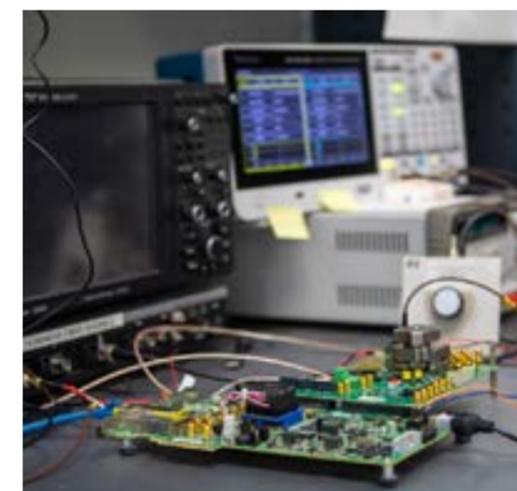
Le groupe a acquis un savoir-faire reconnu en matière de développement et mise en œuvre de systèmes électroniques équipés de liaisons séries à haut débit et de composants programmables de type FPGA. Pour ces derniers, des algorithmes spécifiques ont été créés sous la forme de 'firmwares', notamment utilisés dans l'électronique de déclenchement du calorimètre électromagnétique de CMS. Ces développements poussent le groupe à relever des défis techniques toujours plus ambitieux dans la manière de concevoir et d'implanter des algorithmes et d'utiliser des méthodes et outils de conception qui sont mis à leur disposition. Ceci permet au groupe de se positionner comme un des leaders dans le domaine du 'développement firmware sur FPGA'. Un autre domaine d'excellence du groupe concerne la maîtrise de

chaînes d'acquisition de donnée pour détecteurs de physique mis en œuvre avec leurs capteurs et leurs électroniques associées. Mettant à profit la proximité du laboratoire OMEGA et du groupe microélectronique du CEA/IRFU pour certains projets dans lesquels le laboratoire est impliqué, le groupe réalise avec efficacité les développements d'électroniques pour le contrôle et la lecture d'ASICs conçus par ces équipes. Dans ce cadre, les agents impliqués mettent à profit leurs compétences en électronique numérique sur composants programmables pour structurer les systèmes de transfert de données et de contrôle commande. Le groupe a également la capacité de déployer des bancs de tests pour la qualification de détecteurs (mesures courant-tension, charge-tension, diaphonie électrique, stimulation optique) et/ou

d'environnements électroniques dédiés (génération et analyse de vecteurs de tests sous forme numérique).

Dans le cadre d'implications où doivent être conçues des cartes électroniques, le groupe s'appuie sur ses 2 Assistants Ingénieurs experts en CAO électronique. Ils ont la capacité de concevoir des circuits imprimés (PCB) multicouches, compacts et à haute densité, sur lesquels on peut trouver des signaux rapides et à bas bruit, parfois avec liens séries supérieurs au gigabits/s. Les composants et les techniques employées sont souvent en limite de technologie. Pour ce faire, le souci constant des ingénieurs et de nos 2 concepteurs PCB est d'assurer l'intégrité du signal et vérifier le respect des règles de compatibilité électromagnétique.

Enfin, le groupe possède une très bonne expertise en conception et routage de



cartes complexes HDI dans le respect des normes IPC.

Afin de valoriser ces savoirs, les membres du groupe interviennent régulièrement par la formation d'étudiants et stagiaires, (niveaux DUT, M1, M2, apprentis ingénieur) par des exposés lors de conférences et séminaires de collaboration ou par le biais de publications. Le groupe d'électronique et d'instrumentation, tout en capitalisant sur ses expertises actuelles, mène une veille technologique active et souhaite prendre le virage vers de nouvelles compétences répondant aux évolutions offertes par l'électronique moderne afin de rester un groupe numérique visible et compétitif au sein de l'institut et au-delà. Les agents du groupe participent ainsi régulièrement à des formations et écoles (CNRS, IN2P3, CADENCE, autres). Ils sont aussi activement impliqués dans les réseaux technologiques métiers mis en place par l'IN2P3, à savoir les réseaux DAQ et PCB.

Dans l'optique de veille technologique une attention particulière est portée au déploiement du processeur embarqué RISC-V dont l'architecture ouverte offre des opportunités prometteuses pour le développement de systèmes embarqués par rapport aux technologies propriétaires comme ARM. Le groupe a ainsi la volonté d'acquérir les connaissances nécessaires pour exploiter pleinement le potentiel du RISC-V dans ses futurs projets et explore actuellement diverses pistes de collaborations techniques afin d'évaluer, sur cible FPGA, les possibilités offertes par cette architecture de processeur. Parallèlement, suite au départ en 2023 d'un ingénieur expert en UVM (Universal Verification Methodology), le groupe souhaite se réapproprier cette compétence indispensable afin d'améliorer la couverture de codes dans les développements d'algorithmes de traitement de données des systèmes électroniques. L'adoption de l'UVM permettra d'assurer une validation plus rigoureuse et complète des conceptions,

renforçant ainsi la fiabilité et la robustesse des systèmes développés.

En ce qui concerne l'analyse de l'intégrité du signal, le groupe est convaincu de l'importance cruciale de cette activité dans la conception de cartes électroniques haute performance pour les chaînes d'acquisition et particulièrement l'électronique *front-end* de nos détecteurs. Des efforts de formation doivent être maintenus pour renforcer les compétences du groupe dans ce domaine, afin de garantir des performances optimales et une qualité de signal maximale dans ses réalisations. Enfin, la simulation continuera d'occuper une place prépondérante dans les perspectives à venir du groupe. En investissant dans des outils de simulation avancés et en affinant les techniques de modélisation, le groupe vise à anticiper et à résoudre efficacement les défis technologiques futurs. Cette approche proactive permettra d'explorer de nouveaux horizons dans le développement de systèmes électroniques, tout en assurant une adaptation agile aux évolutions du domaine.

Pour ces prochaines années, le groupe électronique devra assurer ses engagements pris notamment pour l'upgrade CMS-HGCAL. Ceci concerne le développement d'algorithmes sophistiqués de déclenchement, et notre contribution récente à la prise en charge du routage, effectué au LPCA, de 3 variétés de cartes électronique *front-end* "WAGON" pour la partie HD "High Density" du calorimètre.

Des études préparatoires liées au projet du futur collisionneur EIC situé à Brookhaven sont en cours. Le groupe pourrait se positionner sur une électronique de *front-end* mettant en œuvre un ASIC OMEGA.

Notre engagement sur les projets Neutrinos des années passées présagent de nouvelles contributions au futur de T2K et HK.

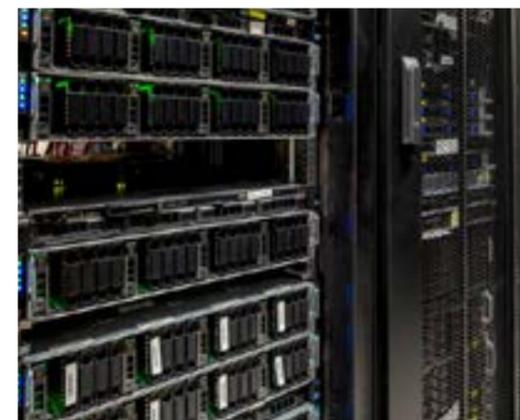
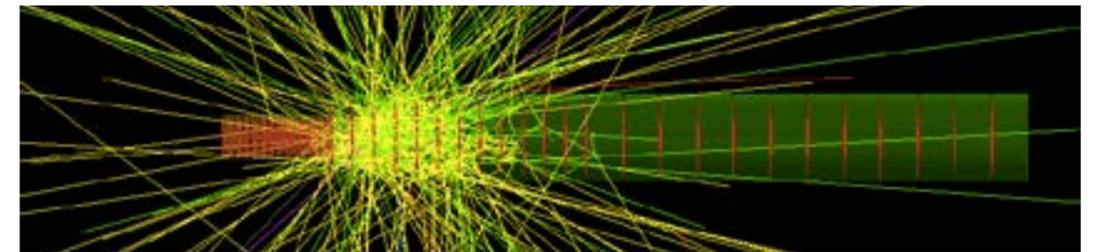
Nous devons également poursuivre notre contribution à la mise en œuvre d'une chaîne d'acquisition pour la lecture d'une électronique bas-bruit développée par le CEA/IRFU/CEDI (projet PEPITES). Toujours avec le partenaire IRFU, nous pourrions être amenés à collaborer pour la caractérisation et la sélection d'une électronique de détection pour l'Upstream Tracker de l'expérience LHCb.

INFORMATIQUE

Le groupe informatique a pour missions de faire évoluer et maintenir en condition opérationnelle les infrastructures du laboratoire ainsi que de développer des codes de pilotage, d'acquisition de données, de simulations et d'analyse pour le développement et le fonctionnement des détecteurs de particules du laboratoire.

Le groupe informatique comprend

quatre pôles fonctionnels au sein desquels se répartissent une dizaine d'ingénieurs employés par le CNRS ou l'école polytechnique (5 IR et 2 IE CNRS, 4 IR polytechnique), dont un possédant une HDR depuis 2019. Le premier pôle "Calcul et données" assure la dimension opérationnelle des différentes infrastructures de calcul : plateformes à haute performance, grilles de calcul et plateformes de calculs interactifs. De nombreuses opérations d'évolutions matérielles et logicielles sont menées chaque année, en collaboration avec les instances de pilotage de ces infrastructures (GRIF, LCG-France, WLCG...). Le pôle collabore également avec de nombreuses instances comme les groupes informatiques de l'école polytechnique (DSI, méso-centre, autres laboratoires) mais également avec le centre de calcul de l'IN2P3 et l'AMUE, ainsi



que les constructeurs d'infrastructures. Moyennées sur une année, les activités de ce groupe représentent 2.5 ETP.

Le deuxième pôle "*Analyse offline et simulations*" est responsable de la production de programmes de simulations pour les différentes expériences du laboratoire. En particulier, les simulations pour l'expérience CMS donnent lieu à de nombreux développements ainsi qu'à une intégration continue permettant le monitoring de la qualité. Un autre développement majeur est le framework *open-source* SMILEI, simulateur "*Particle in cell*", permettant des calculs d'interaction laser-plasma. Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications dans le cadre de contrats doctoraux et post-doctoraux. Enfin, le pôle s'implique dans le développement du framework Geant4, dont le *spokeperson*, Marc Verderi, est chercheur au laboratoire. Le pôle s'implique dans le développement du cœur du simulateur, dans les événements de physique, dans l'enseignement, le management et la diffusion du framework. Moyennées sur une année, les activités de ce groupe représentent 4 ETP.

Le troisième pôle "Online" assure le développement des programmes de pilotage des détecteurs ainsi que l'acquisition et l'analyse temps-réel des données. L'ensemble des projets du laboratoire nécessite ce type de développement spécifique. Ces travaux présentent la spécificité d'une collaboration très étroite avec le groupe électronique et de nombreuses implémentations sur des environnements matériels complexes ou embarqués. Un *framework open-source* nommé Pyrame est développé au laboratoire pour mutualiser l'ensemble de ces développements. Moyennées sur une année, les activités de ce groupe représentent 1.5 ETP.

Le dernier pôle "Machine learning" est responsable du développement de

programmes d'analyse de données basé sur l'intelligence artificielle. Cette activité a été initiée depuis 2017 par une cellule composée de chercheurs et d'ingénieurs qui, à travers une activité pédagogique, ont contribué à populariser ces thématiques au sein des groupes de recherche. Le pôle "Machine learning" s'est appliqué au fil des années à fournir à ces groupes des outils et des techniques pour intégrer ces techniques dans les travaux de recherche. Au-delà de cette démarche opérationnelle, un certain nombre de travaux de recherche et développement ont vu le jour, concrétisés par un financement de l'ANR, dont le porteur est le responsable du groupe informatique et d'une thèse de doctorat de 3 ans, pour le projet OGCID: caractérisation optimisée de particules par des techniques de réseaux de neurones à convolution de graphes. Le pôle s'est également investi dans le master-projet QC2I de l'IN2P3, financé par le labex P2IO et accueillant un post-doc de 2 ans, dont le but est d'utiliser les ordinateurs quantiques pour faire du Machine Learning et dont le responsable scientifique est là aussi le responsable du groupe informatique. Le pôle est également investi dans le master-projet THINK de l'IN2P3 pour implémenter des réseaux de neurones dans des designs électroniques. Moyennées sur une année, les activités de ce groupe représentent 2 ETP.

L'expérience acquise et les compétences développées au sein du groupe informatique, ouvrent diverses perspectives pour chacun des pôles d'activité. Pour le pôle "*Calcul et données*", le principal objectif est d'améliorer l'infrastructure de calcul, principalement, l'augmentation de la puissance de calcul et de stockage, l'amélioration de la redondance réseau, mais aussi une meilleure intégration des nouveaux environnements de calcul. Pour le pôle "*Offline et simulations*", il s'agit principalement d'améliorer les frameworks en vue d'une encore

meilleure performance, à travers l'intégration des nouveaux modèles de calcul (GPUs par exemple) et l'intégration continue. Une approche intéressante est également de les rendre plus compatibles avec l'approche *open-data* science par des connecteurs aux grandes plateformes de diffusion des données scientifiques. Pour le pôle "Online", au-delà de tous les objectifs opérationnels liés aux différentes expériences du laboratoire, c'est l'extension et l'évolution du framework Pyrame qui représente le futur, notamment à travers un meilleur support des différents systèmes et une intégration des flux de données en temps-réel. Enfin, pour le pôle "*Machine-learning*", l'enjeu est de répondre à la sollicitation croissante des groupes de physique à travers une approche globale et mutualisée. Cela passe par la maîtrise des nouvelles architectures qui bouleversent la discipline très régulièrement (réseaux génératifs, programmation différentielle, Machine Learning quantique...) et leur mise à disposition dans les programmes d'analyse. Une part de plus en plus importante du pôle doit aussi se positionner dans la recherche de nouveaux algorithmes dédiés aux problématiques spécifiques de nos expériences: segmentation sémantique pour la réduction de pile-up, génération rapide de simulations, optimisation complexe des détecteurs, etc.

3.6.3 Contributions techniques marquantes

Pour la physique des hautes énergies, les groupes techniques pour la période concernée se sont impliqués principalement sur le projet CMS phase 2 upgrade du calorimètre ECAL d'HGCAL, doté d'un financement "Très Grandes Infrastructures de Recherche" TGIR. Ils se sont également impliqués dans la R&D e^+e^-/FCC (originellement "CALICE") pour un calorimètre-imageur ultra-granulaire en vue d'un futur collisionneur e^+e^- .

Depuis l'origine du détecteur CMS au CERN, le groupe mécanique a acquis

depuis les années 90 une reconnaissance à travers ses contributions allant de la conception mécanique à la production de la partie barrel du ECAL. C'est donc naturellement que le groupe mécanique du LLR a endossé la responsabilité du design et de la production des cassettes de refroidissement et des multiples outillages nécessaires au montage et tests du calorimètre ECAL sur site.

L'électronique frontale (*front-end*) des modules embarqués sur l'ECAL d'HGCAL est basée sur l'ASIC HGCROC développé par OMEGA. Depuis de nombreuses années, le LLR a tissé des liens étroits avec OMEGA en développant dans un premier temps les systèmes électroniques dédiés au contrôle, lecture, tests et caractérisation de leurs ASICs, puis dans un second temps en concevant les cartes d'électronique frontale (*front-end*) embarquant ces ASICs pour des collaborations dans lesquelles les deux laboratoires sont impliqués.

Fort de ces expériences, l'ensemble des groupes techniques du LLR a pris la responsabilité de la conception de A à Z de 2 robots de tests et caractérisation de la future production (~120 k ASICs encapsulés en boîtier BGA) des ASICs HGCROC basse et haute densités.

Les groupes électronique et instrumentation et informatique du laboratoire sont, de longue date, impliqués dans les upgrades successifs des calorimètres électromagnétique ECAL et hadronique HCAL de l'expérience CMS. Ils ont notamment apporté une contribution majeure aux upgrades dits de phase 1 pour les plus hautes luminosités prévues à partir du Run II en 2015 avec la responsabilité des 120 cartes de déclenchement du ECAL, la refonte complète et l'optimisation des algorithmes de déclenchement de niveau 1 (L1) et firmwares associés embarqués sur FPGAs. Il est donc naturel aujourd'hui que, pour l'upgrade phase 2 du calorimètre ECAL d'HGCAL, ces groupes techniques aient à nouveau

des responsabilités visibles et majeures dans la conception de l'architecture et les codes firmware pour le trigger L1, les codes de simulation du trigger L1, et dans l'amélioration des algorithmes de reconstruction et d'identification de particules par méthodes de Deep Learning.

Pour la physique des ions lourds, le groupe électronique commence à s'investir depuis 2023 dans le projet EIC, suite à l'intention d'un physicien du LLR de rejoindre cette collaboration. Le Electron Ion Collider (EIC) est un projet de collisionneur auprès de Brookhaven National Lab (BNL), capable de délivrer des faisceaux d'électrons et de protons polarisés, ainsi qu'une grande variété d'ions (jusqu'à l'Uranium). Deux points d'interaction sont prévus. Le début de l'exploitation scientifique est espéré à l'horizon 2033. Le "ePIC detector" est le projet de détecteur en cours d'étude pour l'un des deux points d'interaction. Il est composé de nombreux sous-systèmes : un tracking, un détecteur de temps de vol et des détecteurs Čerenkov pour l'identification des particules, des calorimètres électromagnétiques et hadroniques ainsi que des instruments très à l'avant ou l'arrière. Le LLR est essentiellement intéressé par le "electron-going" calorimètre électromagnétique (EEEMCal). Le design actuel est basé sur l'utilisation de 3 000 cristaux de PbWO4 lus par des SiPM. Deux solutions sont à l'étude pour l'électronique de lecture des SiPM : une basée sur des "Flash ADC"/FPGA et une autre, portée par le LLR, basée sur H2GCROC, la version pour SiPM de HGCROC d'OMEGA. Cette dernière a déjà été choisie pour le calorimètre hadronique à l'avant de ePIC. OMEGA est d'ores et déjà en train de travailler sur une version spécifiquement dédiée aux conditions de prise de données de l'EIC, appelée "CALOROC" et modifiant notamment la fréquence d'horloge et l'auto-trigger. Une douzaine de physiciens et d'ingénieurs de IJCLab, LLR et OMEGA sont pour le moment impliqués dans

le projet, à divers degrés, avec pour but de démontrer que la solution inspirée de HGCROC répond aux exigences de EIC. Des premiers tests, dans lesquels le groupe électronique du LLR s'implique, ont eu lieu afin de mesurer les pics de photoélectrons pour différents SiPM. Le calendrier de l'EIC prévoit un début de phase de construction fin 2026 et une phase scientifique à partir de 2033. Le EEEMCal doit être prêt entre mi-2029 et mi-2030. Un *Technical Design Report* (TDR) doit être écrit en 2025. Un des objectifs pour le groupe électronique du LLR est de continuer les études et tests des ASICs CALOROC avec OMEGA durant l'année 2024 et, à plus long terme, de proposer une architecture de carte *front-end* intégrant ces ASICs.

Pour la physique des neutrinos, les groupes techniques se sont impliqués sur l'upgrade de la partie centrale SuperFGD du détecteur proche ND280 de T2K qui permet notamment de reconstruire les interactions des (anti) neutrinos muoniques dans les différentes parties du détecteur et d'identifier les particules produites. Ces informations permettent de prédire les événements attendus dans le détecteur lointain SK. Le groupe électronique, en collaboration avec l'université de Genève, a pris la responsabilité du design de 250 cartes électroniques *front-end* (cartes FEB, 256 voies, 8 ASICs CITIroc de la compagnie Weeroc – un transfert industriel depuis OMEGA) assurant la lecture des MPPC (Multi-Pixel Photon Counters) et en assurant les tests et l'installation sur site avec l'aide des physiciens. Le groupe électronique s'est aussi impliqué sur la R&D d'une nouvelle électronique d'acquisition, à travers la conception d'une carte digitiseur hébergeant des ASICs HKROC (OMEGA) permettant de numériser les formes de signaux en sortie de PMs et de fournir une information en temps avec une résolution pouvant atteindre 20 ps. Cette carte digitiseur permet ensuite de remonter à la charge électrique via des algorithmes

de reconstruction embarqués dans un FPGA. Les excellentes performances mesurées sur la version prototype de cette carte et sa flexibilité en termes de gamme de gains des PMs et algorithmes de reconstruction de charge, lui ouvrent des perspectives d'utilisation pour, soit de futures expériences à base de PMs, soit d'éventuels upgrades d'expériences mettant en œuvre des flash ADCs.

Depuis mi-2023, sur proposition de la collaboration HK et en accord avec l'IN2P3, les groupes techniques informatique et électronique, accompagnés des physiciens HK du LLR, ont pris la responsabilité du développement des bancs de test et calibration de l'électronique *front-end* immergée (cartes *front-end* digitiseurs, cartes LV et HV et carte data processing) dans des conteneurs pour la future expérience HK. Ces tests et calibrations, effectués au CERN, seront menés avant et après fermeture des conteneurs étanches.

Pour les astroparticules, les activités des groupes techniques, et plus particulièrement le groupe mécanique, se sont focalisées sur le projet CTA qui vise à construire la prochaine génération d'instruments pour l'astronomie gamma au sol. L'observatoire comportera des réseaux de télescopes de grande, moyenne et petite taille dans les 2 hémisphères. En tant que laboratoire pionnier dans le domaine de l'astronomie gamma au sol et fort de ses contributions aux caméras des projets H.E.S.S. et H.E.S.S. 2, le LLR s'est naturellement impliqué dans ce projet et assure la responsabilité majeure du WP6 'mécanique et refroidissement' visant à la production des 9 caméras NectarCAM des télescopes moyens (MST) du site nord aux Canaries. L'ingénieur responsable de ce WP6 est également membre du comité de projet de NectarCAM. Chaque caméra MST est constituée de 1 855 pixels photomultiplicateurs organisés en 265 modules de 7 pixels, chaque module comportant une carte électronique de digitisation et de déclenchement. La

structure mécanique hébergeant les modules mesure $3 \times 3 \times 1.5 \text{ m}^3$. Le LLR a aussi pris la responsabilité de l'assurance qualité des caméras NectarCAM et sa coordination avec les homologues des télescopes MST et de l'observatoire CTA.

À l'heure actuelle, la caméra "qualification model" est montée, testée et sera validée mi 2024 avant d'être livrée aux Canaries fin 2024 voire début 2025. 2 autres caméras sont en cours de montage et l'ensemble des structures mécaniques des 6 autres caméras sera livré d'ici fin 2024.

Pour le multidisciplinaire, les groupes techniques sont régulièrement intervenus pour le projet PEPITES et ses dérivés (PEPITES Ultra Flash, SPLIF *spin-off* PEPITES). De même, ils interviennent dans GALOP (Groupe d'Accélération par Laser et Ondes Plasma) avec plusieurs développements dont le code libre *Particle-In-Cell* SMILEI permettant la simulation d'une large gamme de phénomènes physiques et entre autres la simulation d'accélération d'électrons par sillage laser.

4 MÉDIATION SCIENTIFIQUE



Médiation scientifique

Pôle Égalité des Chances

L'École polytechnique conçoit et développe des programmes pour l'égalité de chances, auxquels le LLR participe en accueillant des élèves des Cordées de la Réussite. Nous organisons alors des visites du laboratoire et des forums permettant aux élèves de découvrir les différents métiers de la recherche.

Sur les traces du LLR

A l'occasion des 50 ans de l'IN2P3, le LLR retrace son histoire sous forme d'une frise chronologique : <https://50ans.in2p3.fr/timeline-llr/>

Le LLR sur les ondes

Les chercheuses et les chercheurs du laboratoire interviennent régulièrement dans les médias, et en particulier à la radio où ils sont souvent invités dans les émissions scientifiques ("la Méthode scientifique" ou "La Science CQFD" sur France culture, "les Savanturiers" ou "la Tête au Carré" sur France inter...)



Visites du laboratoire

Nous organisons régulièrement des visites du laboratoire afin de faire découvrir à des publics divers et variés nos activités et développements récents, comme la détection des neutrinos au Japon ou la construction du futur détecteur HGCAL de l'expérience CMS.



50 ans de l'IN2P3

En 2021, l'IN2P3 a fêté ses 50 ans ! Le LLR a fièrement pris part aux festivités en organisant une journée de rencontres et d'échanges autour de ses plus belles réalisations de ce demi-siècle.



Masterclass HEP

Chaque année, le LLR organise 2 sessions de masterclass internationale de physique des particules. Au cours d'une journée complète sur le site de l'École polytechnique, des membres du laboratoire proposent à des élèves de lycées scientifiques une immersion dans le monde de la recherche. Après une découverte des activités du laboratoire, les participants analysent des données réelles de l'expérience CMS et présentent leurs résultats lors d'une vidéoconférence.



Réalité Virtuelle

Vous rêviez d'aller au Japon ? De découvrir l'expérience géante SuperKamiokande et traquer des neutrinos ? Ou de visiter le CERN et "rentrer" à l'intérieur du plus grand accélérateur de particule du monde ? C'est possible, avec nos casques de réalité virtuelle qui proposent une expérience immersive unique à 360° dans ces lieux fascinants.



LES SÉMINAIRES DU LLR

Rendez-vous les lundis à 14h en salle de conférences, au programme :

The bolometric way to the discovery of neutrinoless double beta decay: CROSS, CUPID and beyond

large aggregation of spawning anchovy

The precise measurement of the W boson mass with the CMS detector at the CERN LHC

The Compton Pair prototypes: A next-generation MeV gamma-ray observatory

Slowing down light in vacuum with intense laser pulses: the DeLLight experiment

Chromatographic separation of worm

Les Ludoparticules

C'est grâce aux talents créatifs de Bruno Boyer, ancien post-doc au LLR, que nous avons développé les Ludoparticules, des illustrations sympathiques et originales des particules élémentaires. Déclinées sur plusieurs supports comme le jeu de plateau "Kieski", un memory, des affiches mais surtout un livret, nos Ludoparticules enchantent le public et permettent une approche originale et ludique de la physique des particules.



150 ans de la SFP

A l'occasion du Congrès Française de Physique, nous avons pu présenter au public de la Cité de Sciences et de l'Industrie notre fameux "Kieski", un jeu de plateau basé sur les Ludoparticules pour les grands et les petits !



70 ans du CERN

Le LLR a célébré les 70 ans du CERN, organisés en grande pompe à la Cité des Sciences et de l'Industrie en septembre 2024 ! Au cours de ces 2 journées de festivités, le public nombreux a pu découvrir le monde des particules élémentaires et échanger avec l'équipe passionnée du laboratoire. Avec plusieurs animations, nous avons proposé :

- De jouer au "Kieski" et à cette occasion découvrir les particules du Modèle Standard
- De découvrir EXOGRAPHER, le nouveau jeu vidéo issu de chaire "Science et jeu vidéo" et produit par son Gamelab hébergé au LLR.

Le LLR est aussi intervenu avec les mini-conférences :

- Simuler pour mieux concevoir et comprendre (Marc Verderi)
- Les futurs accélérateurs (Ursula Bassler)

Fête de la Science

Rapport d'activité du LLR

Au menu, des jeux, des animations, de la réalité virtuelle, des expériences réelles et surtout de la science, encore de la science, toujours de la science !

- Rejoignez-nous et vous pourrez :
 - Jouer et découvrir le Modèle Standard avec notre jeu de plateau Tester le tout nouveau jeu vidéo "EXOGRAPHER"
 - Découvrir les particules cosmiques avec la Chambre à Brouillard
 - Tenter d'observer des neutrinos avec notre expérience en direct du Japon
 - Chausser les casques de réalité virtuelle pour plonger dans l'infiniment petit.
 - Visiter notre laboratoire et rencontrer les chercheurs et les chercheuses qui travaillent sur le plus grand accélérateur du monde !
 - Assister à des conférences passionnantes !
- Et surtout venez rencontrer, discuter et échanger avec une équipe dynamique prête à répondre à toutes vos questions !
- Le vendredi : Journée réservée aux scolaires : primaires, collèges et lycées !
- Le samedi : Ouvert à tous !



Chambre à Brouillard

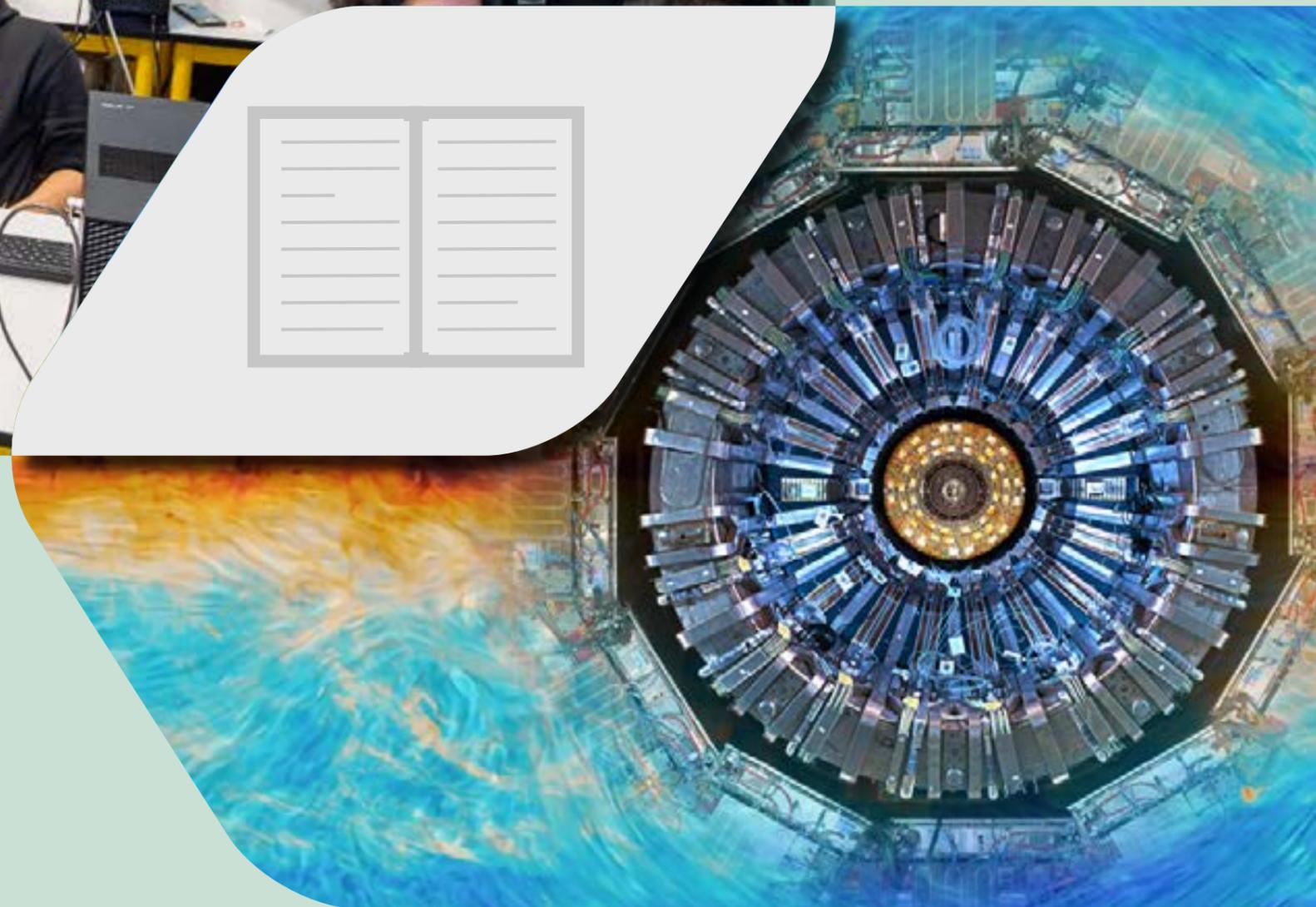
Une machine à glace, un aquarium et un peu d'huile de coude ! Ce sont les ingrédients de la chambre à brouillard « artisanale » construite au laboratoire, et avec laquelle nous pouvons proposer au public de "voir" les particules élémentaires.



Les Infinis à L'Ecole (ILE)

Depuis 2023, cette action réunit un scientifique et une classe autour du thème des deux infinis. A l'école primaire la curiosité des élèves est grande. Si certains thèmes scientifiques peuvent paraître complexes, il n'en reste pas moins possible de sensibiliser les enfants dès le plus jeune âge, en leur permettant d'apprendre ou de s'émerveiller devant les sciences. Ce voyage dans cet univers parfois très éloigné de leur quotidien peut, pour certains, déjà susciter un réel intérêt pour ces disciplines.

5 ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET FORMATION



5.1 Le LLR et l'enseignement supérieur

Le LLR est fortement engagé dans la vie académique de l'École polytechnique et de l'IPP et plusieurs scientifiques assument des charges d'enseignements. Le contact avec les étudiants sur le site de l'IPP à Palaiseau est un facteur d'attractivité important pour le LLR.

Ainsi, plusieurs chercheurs du LLR cumulent la recherche au CNRS et l'enseignement à temps partiel dans le cadre du cycle ingénieur de l'école polytechnique (X) ou des cycles masters ou "bachelor of science" de l'IPP avec différents statuts : Professeur assistant (PA), Professeur Chargé de Cours (PCC), Chargé d'Enseignement (CE) ou Vacataire (V).

En 2024, ce sont huit collègues qui étaient impliqués dans l'enseignement à temps partiel : Andrew Guilbert (PA IPP), Thomas Mueller (PCC X/IPP), Mathieu de Naurois (PCC X/IPP), Pascal Paganini (PCC X/IPP), Roberto Salerno (PCC X), Arnd Specka (PCC X/IPP), Adinda de Wit (PCC IPP) et

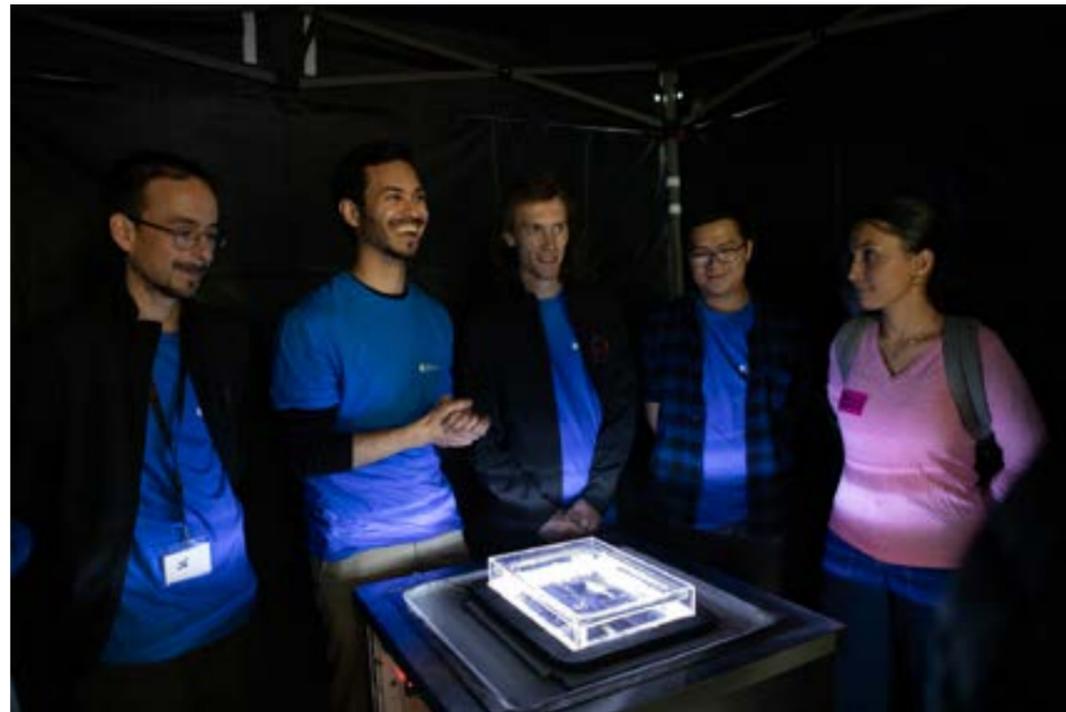
Alexandre Zabi (CE X).

Aussi, le LLR bénéficie d'une professeure à temps plein de l'IPP (équivalent aux enseignants-chercheurs des universités) : Émilie Maurice (PA) impliquée dans les cycles ingénieurs (X) et bachelor (IPP).

Par ailleurs cinq collègues ont contribué à l'enseignement du Master HEP commun à l'École polytechnique/IPP et ETH Zürich (voir la section suivante) au niveau M2 : J.-C. Brient (V), Thomas Mueller (PCC X/IPP), Mathieu de Naurois (PCC X/IPP), Christophe Ochando (V) et Pascal Paganini (PCC X/IPP).

Le LLR entretient également des liens forts avec les départements de physique de l'École polytechnique ou de l'IPP. Ainsi, l'actuel directeur du LLR (Yves Sirois) est à titre personnel membre élu du comité du département de physique de l'IPP depuis juin 2018 où il y assume la responsabilité du pôle "Structures et Lois Universelles", alors que Pascal Paganini est responsable de la mention physique des masters d'IPP.

Signalons également, à l'école des Mines de Paris, l'enseignement de la physique



Chambre à brouillard produite par le LLR.

nucléaire et des particules effectué par Olivier Drapier (V) ainsi que le cours d'introduction à la cosmologie de Vincent Boudry (v).

5.2 Le Master de Physique des Hautes Énergies

Le laboratoire a participé à la création d'un Master de Physique des Hautes Énergies (PHE) en commun entre l'École polytechnique et l'École polytechnique fédérale de Zürich (ETHZ). Ce Master offre une formation de très haut niveau à la fois théorique et expérimentale avec un large spectre allant de la physique des particules et les astroparticules à la cosmologie théorique et observationnelle, en passant par les méthodes avancées de physique expérimentale. Il est dirigé par un Conseil scientifique comprenant des expérimentateurs et théoriciens des deux institutions, dont Pascal Paganini et Thomas Mueller du LLR. Il attire des étudiants d'un niveau exceptionnel provenant aux deux-tiers de l'international et qui viendront par la suite alimenter la recherche au niveau doctoral. En effet, plus de 90 % des étudiants du master poursuivent en thèse de doctorat. Le laboratoire bénéficie ainsi de ces étudiants puisqu'en 2024, huit doctorants du LLR sont issus de ce master soit plus d'un tiers des doctorants du laboratoire.

5.3 PhD, post-docs et HDR au LLR

Le laboratoire compte en 2024 22 doctorants pour 30 physiciens permanents. Les doctorants et doctorantes émargent pour plus d'un tiers à l'École polytechnique, un autre tiers au CNRS, et les autres sur des projets ANR ou ERC, une entente France-Afrique, des bourses du *China Scholarships Council* (CSC), ou une chaire de professeur junior (CPJ) du CNRS.

Le personnel de recherche en CDD (soit 15 "post-doc") est financé pour moitié environ par le CNRS, et pour l'autre moitié par l'École polytechnique, des projets de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), ou des supports au niveau européen (EuroTech Universities Alliance, European Research Council). Les deux tiers des physiciens permanents du LLR possèdent l'habilitation à diriger des recherches (HDR). Sept ont passé cette habilitation entre 2018 et le début 2024.

5.4 Stages et formation par la recherche

Le dynamisme d'un laboratoire de recherche se reflète bien souvent dans sa capacité à attirer de jeunes étudiants notamment lors de stages

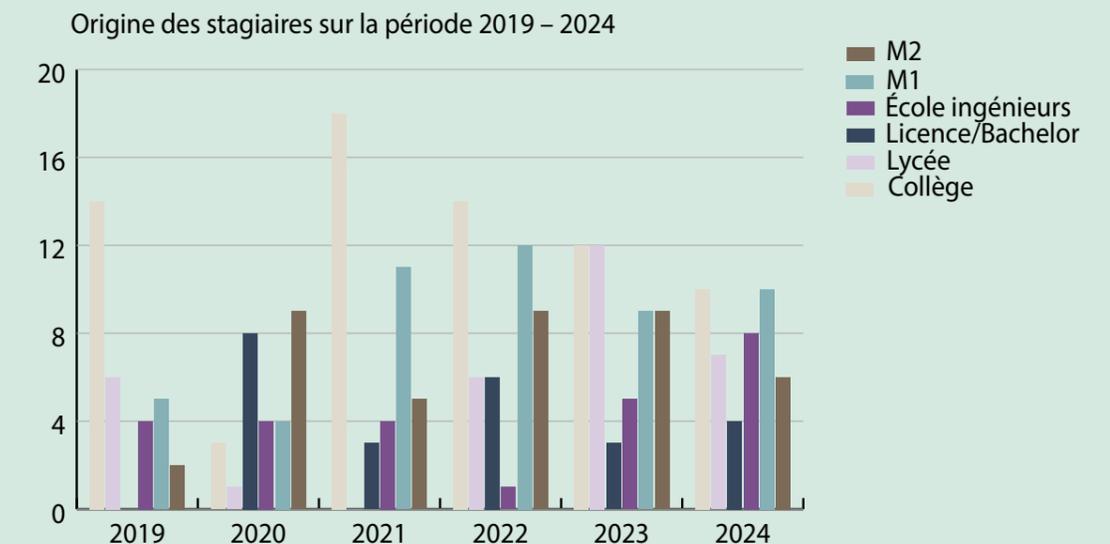


Figure 1 : Origine des stagiaires sur la période 2019 – 2024.

de recherche ou bien de stages longue durée dans le cadre de l'apprentissage. En 2024, le LLR a accueilli (Figure 1) des stagiaires de différents niveaux. Des réalisations techniques intéressantes ont pu être accomplies, comme par exemple une chambre à brouillard qui est depuis utilisée régulièrement lors des manifestations grand public (voir photo).

5.5 La formation permanente

La formation est un outil essentiel, moteur de progrès au service des projets et de tous les agents du laboratoire. Elle est alignée avec les orientations scientifiques et les évolutions des collaborations impliquant le laboratoire. La formation est conçue pour être continue, permettant aux agents de développer et d'améliorer régulièrement leurs compétences sur les nouvelles technologies. Elle couvre non seulement les aspects scientifiques et techniques, mais aussi ceux liés à l'organisation des projets, à la gestion des ressources humaines et à la sécurité. Grâce aux actions du CNRS, et de l'IN2P3, ainsi qu'à notre tutelle l'X, les agents bénéficient de supports de formation performants adaptés à leurs métiers. De plus, les réseaux métiers favorisent le partage des connaissances et des expériences.

Pour répondre à ces exigences, le

LLR s'appuie sur son Correspondant Formation (CoFo). Celui-ci est l'interlocuteur privilégié pour informer, accompagner et faciliter l'accès des agents aux formations, en cohérence avec la politique scientifique et professionnelle de l'unité.

Le recensement des besoins en formation des groupes de physique et technique est formalisé chaque année dans le Plan de Formation de l'Unité (PFU), puis transmis aux tutelles. Tout au long de l'année, le correspondant formation assure le suivi de la mise en œuvre de ce plan.

Bilan de la formation en chiffres.

Pendant la période étudiée, les agents du laboratoire ont suivi plus 320 jours de formation. La répartition des formations selon le type de population a été la suivante : 52 % pour la BAP C, 23 % pour la BAP J, 14 % pour les physiciens et 10 % pour la BAP E.

Ces formations ont été dispensées dans les domaines principaux suivants :

- L'intégration de nouveau personnel
- Les formations dédiées métier
- L'environnement d'activité
- La carrière des agents.

Au cours de la période considérée, cela concerne environ 150 agents, incluant les IT et les physiciens. Cela équivaut à 114 actions de formation (voir Figure 2).

Répartition jours actions formation et jours de formation par année

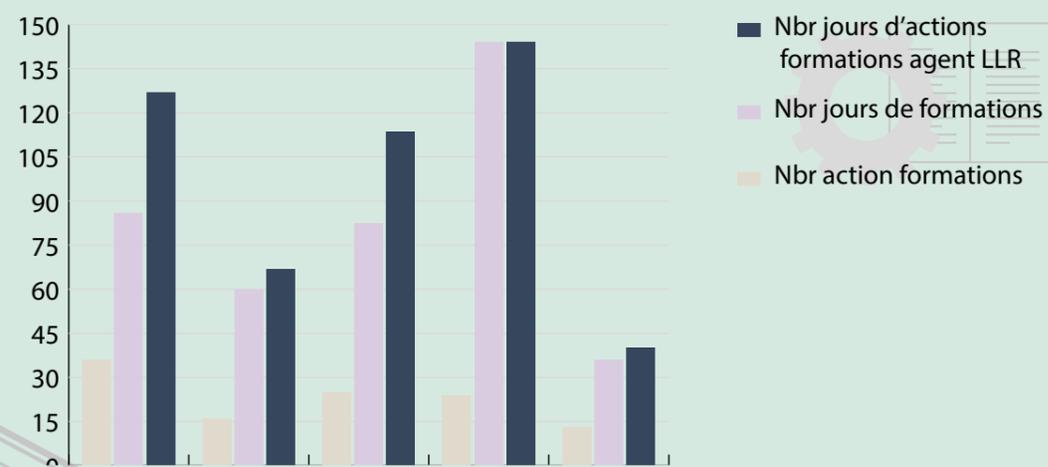


Figure 2 : Répartition jours action formation et jours de formations par année.

Comme l'illustre la Figure 3, ces jours de formation, qui englobent des thématiques techniques ainsi que des formations en encadrement de projet et en management, ont bénéficié d'une participation significative des ingénieurs de recherche.

Chaque année, un effort particulier est déployé pour la formation des nouveaux entrants afin de faciliter leur intégration au sein des services et des projets. De même, les personnels étrangers

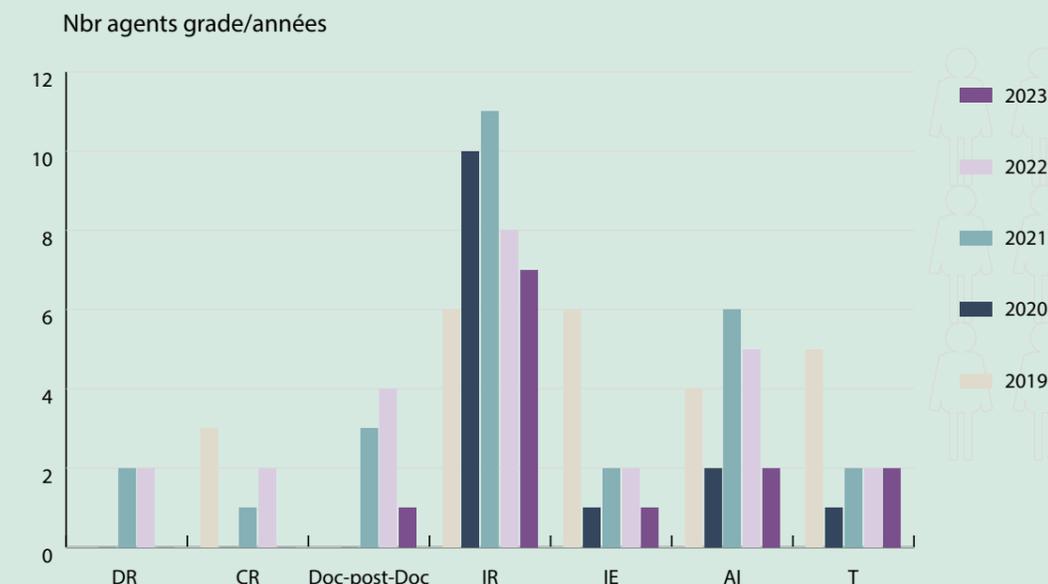


Figure 3 : Nombre agents formés par grade et par années.

(chercheurs en CDD, post-doctorants et doctorants) peuvent bénéficier de cours de Français Langue Étrangère (FLE) par l'intermédiaire du CNRS et l'X. Ces formations, très demandées,

sont extrêmement appréciées par la communauté scientifique internationale.

Les demandes de formation en IAO-CAO sont récurrentes, car elles permettent aux groupes électronique et mécanique

Répartition par BAP

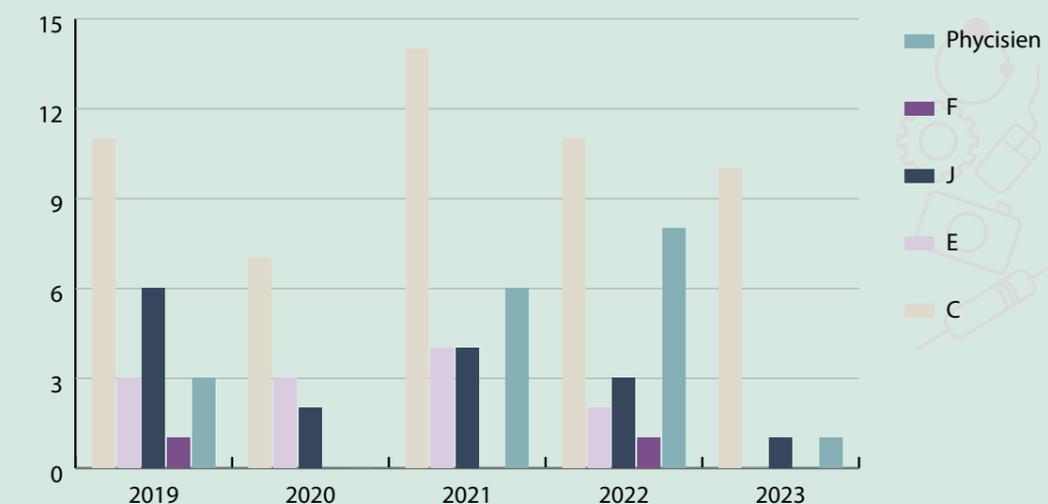


Figure 4 : Répartition par BAP.

de maintenir leur performance avec les outils utilisés. Les écoles thématiques et les Actions Nationales de Formation (ANF) de l'IN2P3, spécifiques à notre discipline, permettent aux agents de mieux appréhender le milieu scientifique dans lequel ils travaillent.

L'environnement de travail des agents implique des conditions particulières d'activité, rendant cruciales les formations en matière de sécurité (habilitation électrique, manipulation d'autoclaves,

machines de découpe à jet d'eau, ponts roulants, SST, etc.). Le laboratoire s'engage à garantir des conditions de sécurité optimales pour son personnel et forme chaque année de nombreux agents à cet effet.

En examinant cette période, les **Figures 4 et 5** révèlent que les formations dédiées à l'évolution des métiers dans chaque thématique du laboratoire, qu'il s'agisse de métiers administratifs ou techniques, sont prépondérantes

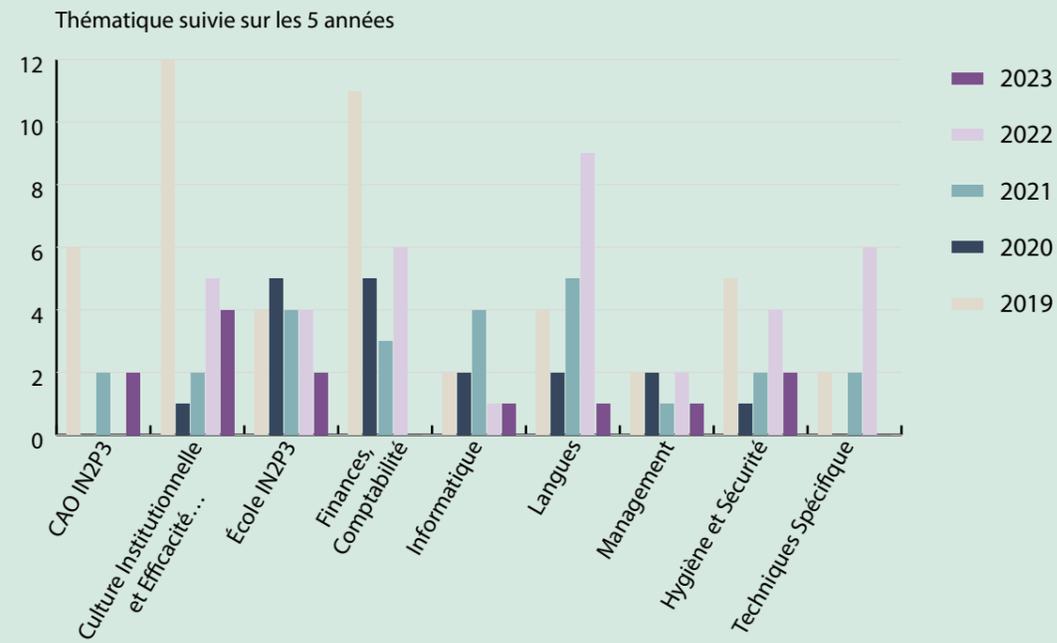
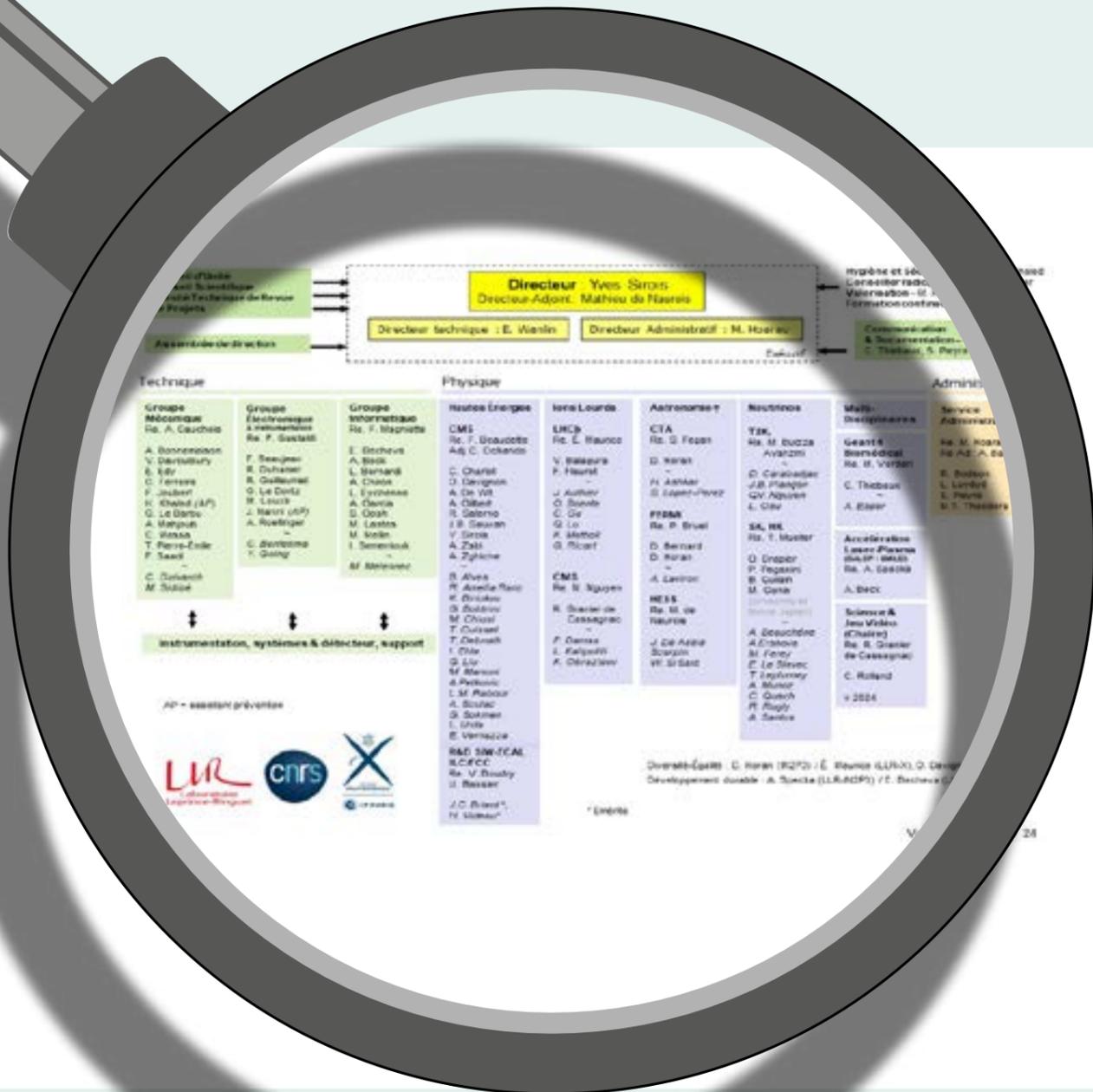


Figure 5: Thématiques suivies sur les 5 années.



6 ORGANISATION ET RESSOURCES



6.1 Caractéristiques du personnel au LLR

Le LLR disposait au 31/12/2023 d'un personnel d'environ 100 personnes, dont 2/3 de permanents. Ce personnel est réparti à parts approximativement égales en trois groupes : les physiciens permanents, les ITAs (ingénieurs, techniciens, administratifs) et les doctorants et post-doctorants. L'effectif permanent pour les chercheurs est quasi exclusivement constitué d'agents

du CNRS tandis qu'environ 1/4 des effectifs ITAs sont employés par l'École polytechnique.

La répartition détaillée par catégorie est montrée à la **Figure 1**.

L'évolution des ressources humaines au cours de la période est illustrée à la **Figure 2**.

La pyramide des âges pour le personnel permanent est montrée à la **Figure 3**.

Répartition des personnels par catégories au Laboratoire Leprince-Ringuet

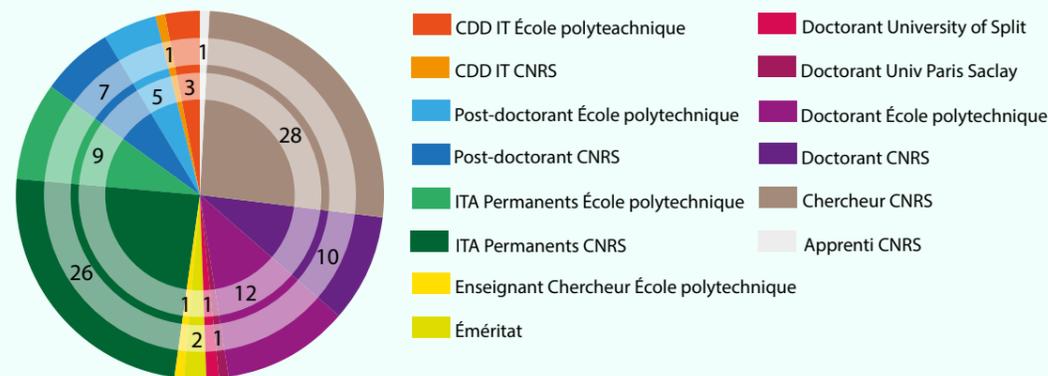


Figure 1 : Répartition des personnels par catégories au Laboratoire Leprince-Ringuet ; photographie au 31/12/2023.

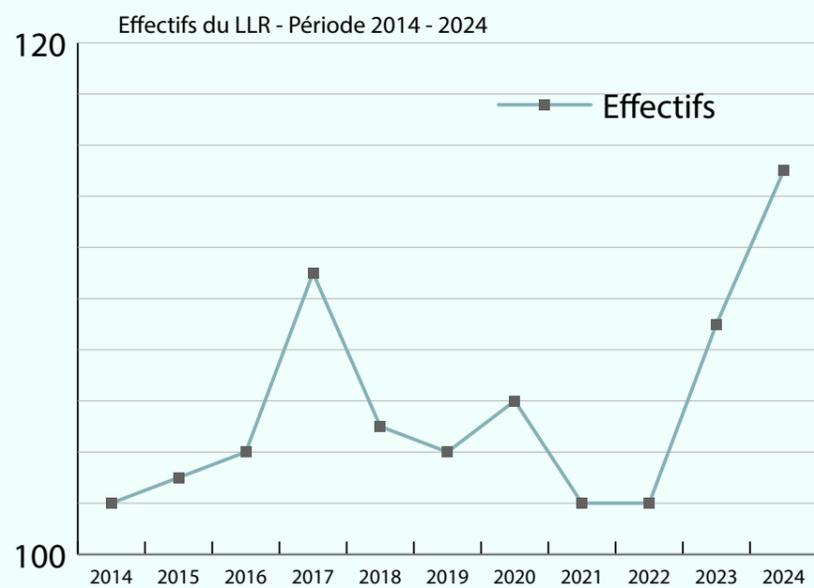


Figure 2 : Répartition des personnels au Laboratoire Leprince-Ringuet ; photographie au 31/12/2023.

Pyramide des âges pour le personnel permanent du Laboratoire Leprince-Ringuet

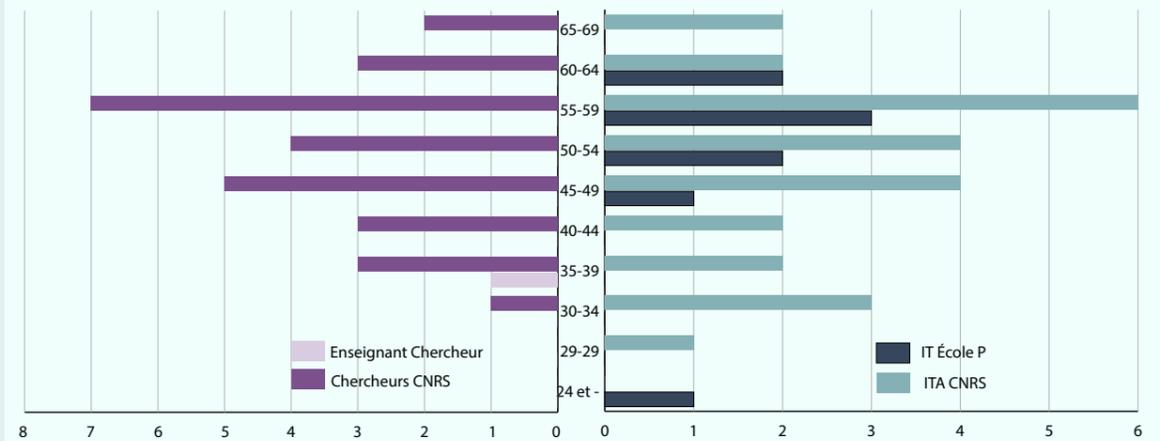


Figure 3 : Pyramide des âges pour le personnel permanent du Laboratoire Leprince-Ringuet ; photographie au 31/12/2023

6.2 Participation aux appels à projets

Le laboratoire encourage fortement la participation aux appels à projets dont en particulier les programmes de l'ANR et de l'ERC. Chaque année entre 3 et 5 projets ANR sont déposés et la plupart du temps au moins 1 projet ERC (souvent des "starting grants"). Les jeunes permanents sont particulièrement incités à déposer des projets. Le taux de succès pour des projets qui, quoiqu'originaux, se déroulent en tout ou partie au sein de grands projets au niveau international n'est pas particulièrement élevé pour les laboratoires de l'IN2P3.

Le LLR a pu profiter d'une ERC obtenue en 2020 par Leticia Cunqueiro pour la physique des ions lourds, en collaboration avec Matthew Nguyen. Ce projet, QCDHighDensityCMS, se poursuit actuellement et le LLR bénéficie d'un post-doctorant malgré le fait que Leticia ait accepté un poste permanent de professeure à l'Université de Rome (La Sapienza) en 2021. Environ 1 doctorat sur 6 et 1 post-doc sur 4 en moyenne au LLR sont financés sur contrat ANR ou ERC.

Une quinzaine de contrats était en cours en 2023 au LLR. Parmi ceux-ci, six se situent au niveau européen :

- STRONG – 2020 – The strong interaction at the frontier of knowledge : fundamental research and applications

- From Super-Kamiokande to Hyper-Kamiokande – SK2HK
- AIDAInnova – Advancement and Innovation for Detectors at Accelerators
- I.FAST – Innovation Fostering in Accelerator Science and Technologies
- ERC – QCDHighDensityCMS
- EuPRAXIA – Preparatory Phase

Les autres s'appuient sur des financements nationaux :

- ANR – HiGranTS : Systèmes de déclenchement pour détecteurs ultra-granulaires dans des environnements de HE et de HL
- ANR – THERMOfixed : Mesurer la température du déconfinement avec la cible fixe de l'expérience LHCb
- ANR – OGCID : Convolution optimale de graphes pour l'identification efficace de particules
- ANR – MOTS : Observations multi-messagers du ciel transitoires
- ANR/CPJ - Contrat de chaire professeur junior : STORM
- ANR – T-CALO : Timing in Calorimeters
- ANR – CALO5D : Calorimetry in Five Dimensions
- SPLIF (subvention de pré-maturation IPP)
- GTNUM (subvention du Ministère de l'éducation nationale et de la jeunesse)

À cette liste s'ajoutent les contrats spécifiques de coopération en cours avec financement de thèses tels les contrats

CNRS-Imperial College Joint PhD, JRP CNRS-Afrique ou encore les contrats de coopération avec la Chine via l'IPP.

Le laboratoire dispose de relativement peu de ressources propres et doit pouvoir pallier en priorité aux impondérables liés aux contrats de recherche (prolongement exceptionnel de thèse, pont de quelques mois en amont ou en aval d'un prochain contrat post-doctoral ou d'un contrat d'ingénieur sur le chemin critique de nos activités).

Le laboratoire a émergé pendant 11 ans au laboratoire d'excellence de Physique des 2 infinis et des origines (LabEx P2IO). Ce LabEx avait été mis en place en 2011 à l'Université Paris-Saclay dans le cadre d'un programme d'investissement d'avenir (PIA). Il était alors rattaché à l'IdEx Paris Saclay (IPS) et l'École polytechnique était partie prenante. C'est un physicien du LLR, Philippe Busson, élu au Sénat académique de l'Université Paris-Saclay en avril 2013, qui a été ensuite Directeur du LabEx P2IO de janvier 2015 à avril 2018. Le LLR a pu obtenir des soutiens de cette première mouture du LabEx P2IO jusqu'en 2022. Entre-temps, l'École polytechnique a quitté l'Université Paris-

Saclay à l'automne 2017 et n'est donc pas associée à la version renouvelée pour 5 ans en février 2019 du LabEx P2IO.

En 11 ans, c'est plus de 2 M€ d'investissements du LabEx P2IO qui ont profité au LLR. Cela représente des moyens d'action annuels (nouveaux projets, travail en commun avec les laboratoires de la région, financement de thèse ou de post-doctorants) de près de 200 k€/an qui n'ont pas pu être compensés sous une forme ou sous une autre à ce jour depuis la création de l'Institut Polytechnique de Paris.

6.3 Le service administratif

Le Laboratoire Leprince-Ringuet est une unité de recherche du CNRS (rattachée à l'IN2P3) et de l'X. Son fonctionnement est garanti par un service administratif et financier composé de 6 personnes. Centré sur l'accompagnement des projets de recherche de l'unité, il assure la gestion des budgets (sur subvention d'État et sur ressources propres), la gestion administrative des personnels et le suivi des ressources matérielles aux bénéficiaires des équipes de recherche et groupes techniques.

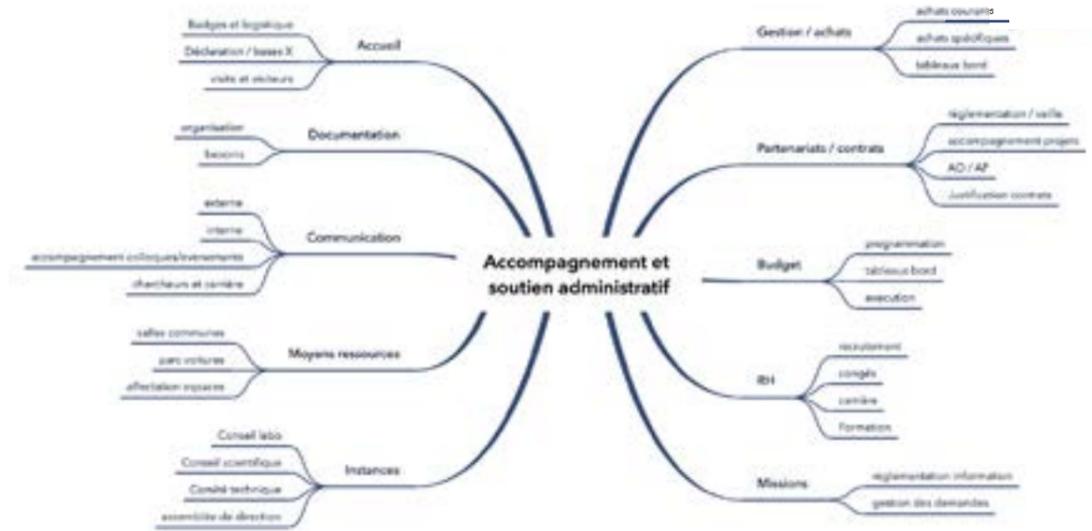


Figure 4 : Activités du service administratif

accompagne au quotidien l'ensemble des personnels dans le but d'optimiser les demandes de missions, de consolider les dossiers aux appels à projets ou de produire les bilans et justifications financières propres aux contrats de recherche (Figure 5).

La pandémie Covid a indubitablement eu une conséquence sur le rythme des déplacements professionnels au cours de

cette période. Le pôle financier apporte un soutien constant dans la préparation des missions, lesquelles représentent une part importante des budgets des groupes. Les membres du laboratoire effectuent en moyenne 500 missions par an essentiellement sur les lieux des grandes expériences internationales (Suisse, Allemagne, Japon, Etats-Unis). (Figure 6)

Les effectifs :

Le **service administration** dirigé par Michel Hoarau comprend 6 permanents :

- **Permanents :** Alimata **BAGAYOKO**, Réjane **BODSON**, Stéphanie DELHAYE⁽¹⁾, Mélanie FRAYSSINET⁽²⁾, Michel **HOARAU**, Laetitia **LUYEYE**, Sylvaine **PIEYRE**, Marie-Thérèse **THEODORA**, Thu BIZAT⁽³⁾.

⁽¹⁾<2021 ⁽²⁾<2020 ⁽³⁾<2019



Le service est organisé en trois secteurs d'activités parfaitement interconnectés : le pôle financier, le pôle ressources humaines et le pôle médiation scientifique et événements.

Il conduit et gère nombres d'activités au travers de ces pôles : **Figure 4**

Le pôle financier :

Il gère toutes les demandes d'achats de l'unité provenant des groupes de physique, des groupes techniques et de la direction. Il participe activement à l'instruction des demandes et engage les opérations conformément à la réglementation des marchés publics. Il

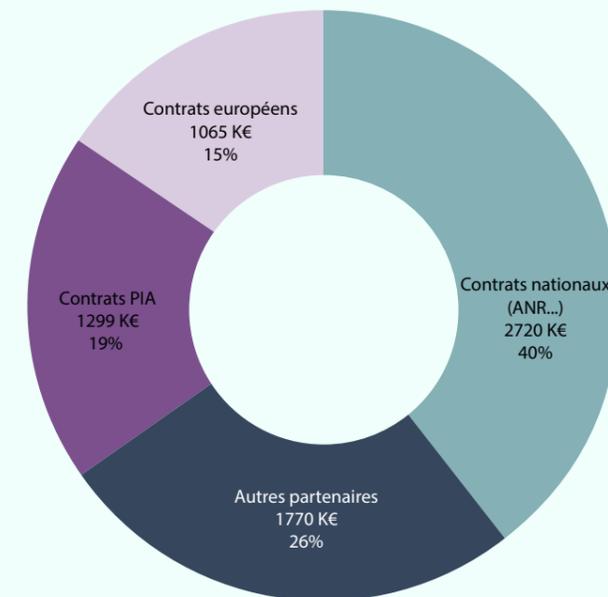


Figure 5 : Nombre de contrats sur ressources propres sur la période 2019-2024.

Évolution des missions entre 2019 – 2024 en comparaison avec les 2 années antérieures

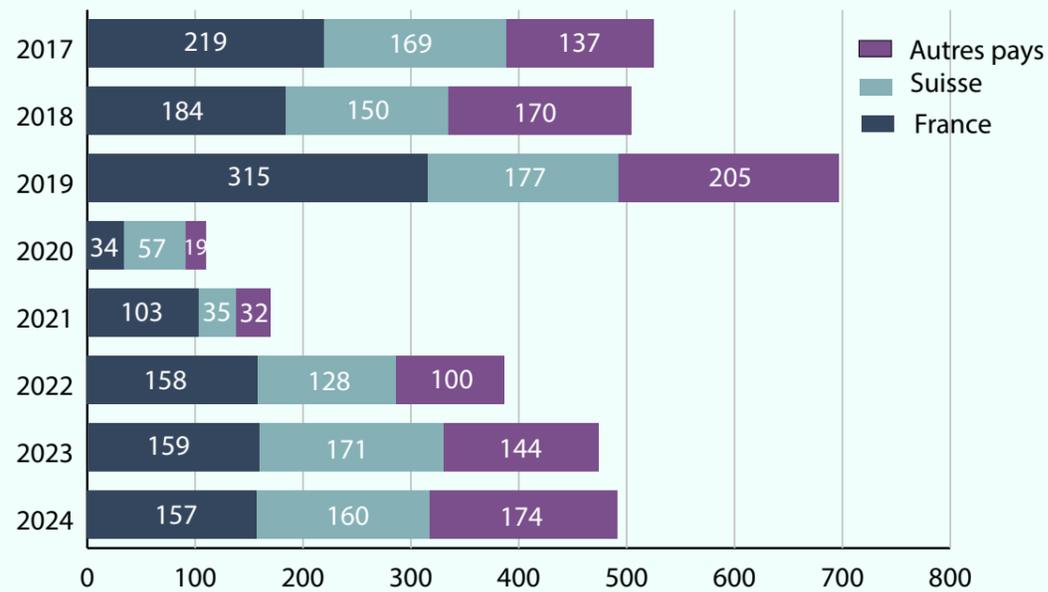


Figure 6 : Distinction des missions en France et Suisse (Cern) par rapport aux autres pays.

Le pôle ressources humaines:

Ce pôle a pour mission de conseiller et informer les personnels sur les statuts et obligations (Figure 7) Il accompagne l'ensemble des personnels dans les démarches de demandes administratives (prise de fonction, suivi des congés, arrêts maladie, télétravail, dossiers carrière...). Il étudie et gère chaque demande de recrutement et initie la procédure selon le fonctionnement des tutelles.

Le laboratoire recrute chaque année plus d'une vingtaine de collaborateurs (doctorants, post-doctorants ou ingénieurs), très majoritairement étrangers. Le pôle apporte un appui particulier s'agissant des formalités d'entrée sur le territoire, de conseils pour accompagner ces personnes dans leurs démarches d'installation et d'ouverture de comptes divers.

Le Laboratoire Leprince-Ringuet accueille chaque année de nombreux stagiaires issues de formations diverses : étudiants en Masters et Licence, bachelor, écoles d'ingénieurs et étudiants en apprentissage. Il participe également à l'effort commun d'accueil de collégiens

et de lycéens sur une semaine ou deux semaines de découverte du monde professionnel. Le pôle est garant de la négociation des conventions de stage et de la signature en amont de la venue des élèves.

Les stagiaires collégiens et lycéens bénéficient en outre d'un programme de découverte spécifique, avec un temps dédié au sein de chaque groupe de physique et groupe de soutien technique ainsi qu'administratif.

En moyenne, ces accueils de stagiaires (hors collégiens et lycéens) représentent chaque année un effort financier au titre des gratifications de l'ordre de 25 k€ à 30 k€.

Le pôle communication et évènements scientifiques :

Il a pour missions de valoriser les réalisations scientifiques et techniques du laboratoire. Il diffuse et anime la promotion de la recherche scientifique conduite par les groupes de physique et technique au travers de différents supports et évènements.

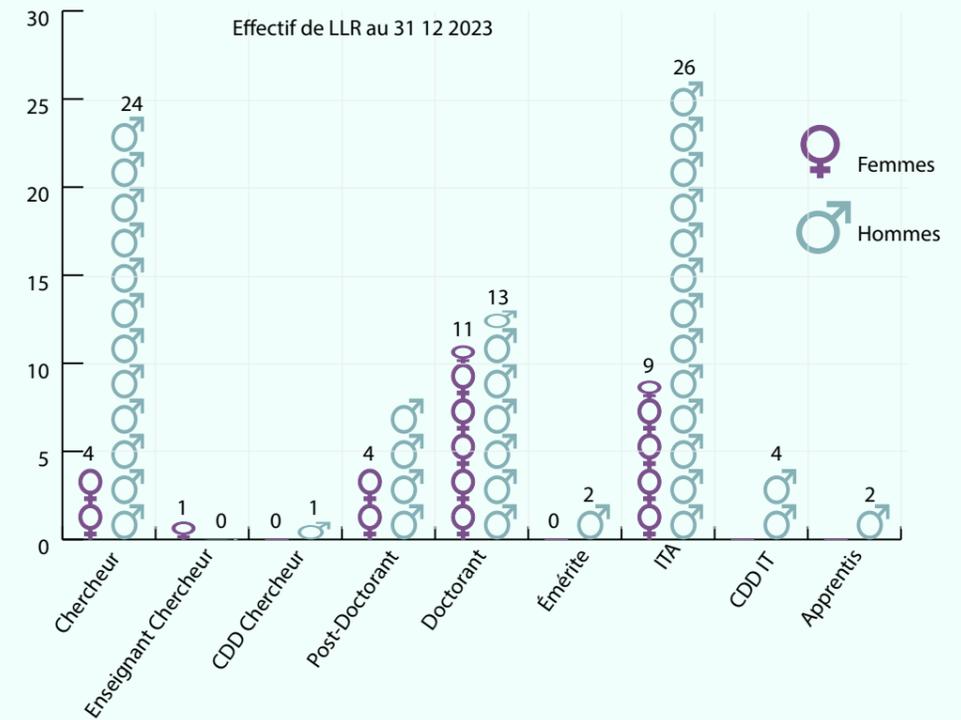


Figure 7 : L'effectif du LLR au 31/12/2023.

Ce pôle joue un rôle essentiel dans :

L'organisation et la coordination d'évènements à portées locale et internationale :

- Gestion logistique : réservation des espaces, repas, et hébergements.
- Supports de communication : création de sites web, goodies, affiches, badges.
- Gestion budgétaire : suivi des recettes

(inscriptions) et des dépenses (prestataires).

- Documentation visuelle : reportage photo et réalisation de films d'interview.

Exemples d'évènements récents : Collaboration T2K en 2019 à Palaiseau (250 participants), CMS Week en 2023 à Saint-Malo (250 participants)



Jeu "Kieski" à la Cité des Sciences et de l'Industrie.

Accueil des nouveaux arrivants :

- Prise de photo individuelle et signature du droit à l'image.
- Création et mise à jour du livret d'accueil.
- Distribution de goodies écoresponsables : chaque agent reçoit une tasse et une gourde afin de réduire l'impact écologique.

Contribution aux événements publics :

Le pôle communication s'implique activement dans les manifestations publiques à travers :

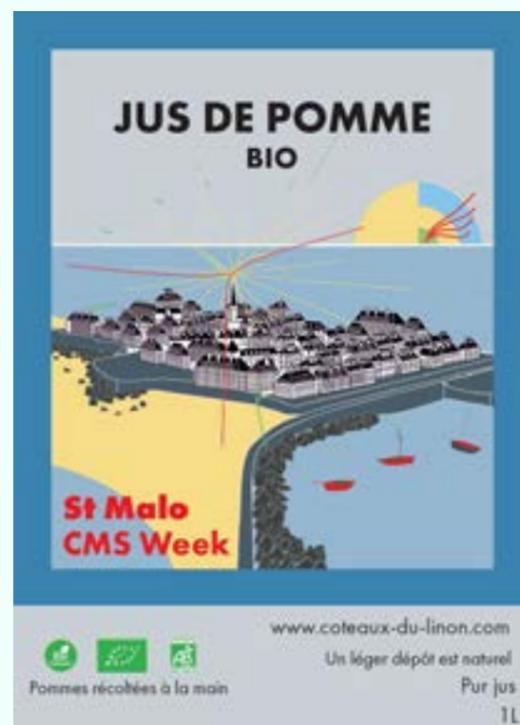
- La conception de supports visuels (affiches, posters).
- La création et déclinaison du jeu "Kieski", proposé sous forme de mé-

mos, affiches, livres et calendriers.
 • L'organisation de la Masterclass CMS, un événement annuel phare.

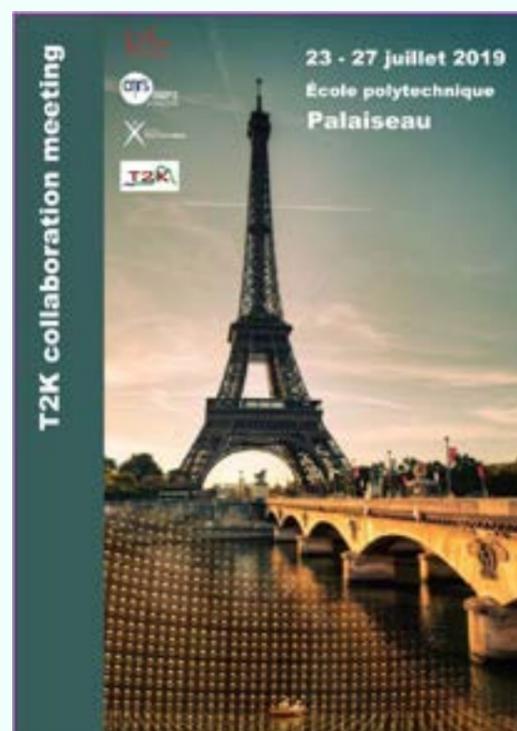
Renforcement de l'identité interne du laboratoire :

Afin de fédérer et valoriser le personnel, plusieurs initiatives sont mises en place :

- Affiches informatives dans les couloirs.
- Trombinoscope géant en salle de café-téria.
- Poster annuel regroupant les photos du personnel prises lors d'événements.
- Organisation des biennales : événements de trois jours en dehors des locaux.
- Soutien logistique et communication autour des soutenances de thèse.



Étiquette goodies.



Affiche de T2K Collaboration Meeting.



Trombinoscope géant.



Amphi ECFA.

Gestion et mise à jour des supports numériques :

Le pôle est également responsable de la mise à jour régulière du site web du laboratoire, afin de garantir une diffusion optimale des informations auprès du public et des institutions.

Valorisation et gestion des archives photographiques :

Le pôle communication s'investit également dans la documentation des activités et des expériences scientifiques :

- Prises de vues lors des événements et expériences, avec une alimentation régulière de la photothèque.
- Numérisation et archivage des photographies argentiques et diapositives

datant de la création du laboratoire en 1936. Ces archives enrichissent la mémoire collective et historique de l'établissement.

Ce travail de communication, tant interne qu'externe, renforce la visibilité et la cohésion du laboratoire tout en respectant des valeurs écoresponsables.

Événements majeurs :

L'École polytechnique est sortie du projet porté par la Comue Paris-Saclay (lequel est dorénavant constitué des trois universités du secteur – Paris-Sud, UVSQ et Evry – mais aussi CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay et IOGS) pour constituer l'Institut Polytechnique de Paris (IPP) autour de l'École polytechnique et des grandes écoles installées sur le site proche (ENSTA Paris ENSTA Brest, ENSAE Paris, Télécom Paris et Télécom SudParis, ENPC). Ce changement a impliqué au niveau du service de prendre en compte de nouveaux acteurs et circuits de validation à différents niveaux (Direction de l'enseignement et de la recherche, Ecole doctorale, direction des Ressources Humaines, direction du budget et des affaires financières, Grant office). Cette structuration de l'IPP, toujours en cours, implique entre autres le déploiement de nouveaux systèmes de gestion dont les membres du service ont dû s'approprier mais aussi former, le cas échéant, les personnes du laboratoire.

Pour faire face aux nombreuses évolutions des réglementations, le service a revu également ses procédures qualité afin de garantir un fonctionnement optimal (dématérialisation des actes, activités en mode télétravail partiel, circuit des visas, etc.). L'impact majeur en termes d'évolution a été et demeure le déploiement de l'ESR missions par le CNRS.

Au cours de cette période, le service a connu également le départ en mobilité de trois personnes dont la responsable administrative et financière.

Le renouvellement de l'unité en 2020 s'est accompagné d'une nouvelle équipe de Direction et en conséquence d'une organisation des élections des membres des différents comités (Conseil de laboratoire, Conseil scientifique, CTRP). Un nouveau règlement intérieur a été adopté en 2022, abrogeant les dispositions du précédent règlement datant de 2007.

6.4 Les moyens techniques et expertises du LLR

Le support technique du LLR est adapté à nos contributions aux grands projets scientifiques internationaux et permet de répondre favorablement aux diverses sollicitations dans les domaines de la mécanique, l'électronique et instrumentation et l'informatique.

Le LLR dispose d'un atelier mécanique équipé de machines modernes et très variées, conséquent pour le développement de prototypes et la construction de composants de grands détecteurs. Parmi les équipements et machines-outils, notons par exemple la présence d'un hall de montage équipé d'un pont 5 T, un tour 5 axes bi-broches TSUGAMI MO6SYE offrant des possibilités extrêmes de réalisations, une fraiseuse AXA, la VCP-40 3 axes, machine hors norme disposant des dernières évolutions dans le domaine de machine-outil, ayant la particularité d'être installée dans une cabine régulée en température permettant de maîtriser le contrôle des pièces réalisées. Sa table de 23 000 mm × 1 500 mm permet d'envisager l'usinage de pièces de grande dimension. Cette fraiseuse 3 axes est l'un des équipements majeurs dans la chaîne de production des cassettes de refroidissement de HGAL CMS. Une machine de découpe à jet d'eau FLOW MACH 24 000 bars permettant la découpe de pièces jusqu'à 1 500 × 1 500 mm, une fraiseuse à commande numérique MIKRON VCE 1 000 PRO disposant d'une table 1 000 × 560 mm, une fraiseuse traditionnelle HURON MU44 disposant d'une table 600 × 1 200 mm, une machine à mesurer tridimensionnelle MMT HEXAGON de grande dimension (course 2 200 × 1 500 × 1 000 mm) indispensable pour réaliser la métrologie avec une précision de l'ordre de 2 µm et le contrôle des pièces usinées, notamment la métrologie des cassettes de refroidissement de HGAL CMS, une presse plieuse ERMAKSAN SPEED PRO à commande numérique, 6 axes,

capacité de pliage de 1 200 mm, une machine de précision à électroérosion, un grand autoclave DAXEN conçu pour la réalisation de pièces composites jusqu'à 1 700 × 1 000 mm (température maximale de 250 °C, pression maximale 10 bars) et ayant permis de développer la structure mécanique du calorimètre du satellite FERMI ainsi que les structures prototype d'un futur calorimètre SiW-ECAL, une machine de traction (50 kN) utilisée pour les tests des éprouvettes (échantillons) des cassettes de refroidissement d'HGAL CMS, une table chauffante BOREL de 1 500 × 1 500 mm nous permettant de réaliser les soudures des tuyaux de refroidissement intégrés sur les cassettes de HGAL CMS, une centrale MARTA de refroidissement par évaporation de CO₂, plusieurs imprimantes 3D employant 2 technologies différentes FDM ou LSA permettant d'augmenter la capacité de notre atelier à répondre rapidement aux demandes et de réaliser du prototypage simpliste, etc.

Pour l'électronique et l'instrumentation, le LLR dispose également de 2 grandes salles de tests d'électronique (137 et 35 m²) équipées de tous les appareils modernes de génération de signaux et de mesures nécessaires aux tests des cartes mixtes ou numériques rapides haute densité. Nous avons développé également des bancs de test et de caractérisation de détecteurs de type matrice de diodes PIN et SIPM, un banc de test climatique permettant de mesurer la fonction de transfert des divers capteurs en fonction des variations de température et hygrométrie, un banc de test de mesures de cross-talk et un Banc Laser picoseconde permettant d'illuminer les capteurs. À cela s'ajoutent des salles blanches (ISO 7 et 6, 33 m² et 35 m²) pour les tests de caractérisation de circuits intégrés ASICs. L'une d'entre elles accueille un de nos 2 robots de test d'ASICs encapsulés HGCROC (développés par OMEGA) présents sur les hexamodules des cassettes de refroidissement de HGAL CMS. Ces robots ont entièrement

été conçus au LLR et permettent le test de centaines de milliers d'ASICs.

Pour l'informatique, le LLR dispose d'une salle climatisée (30 m²) pour héberger des baies de serveurs nous garantissant une redondance pour nos services critiques. L'école polytechnique nous offre également une grande salle de calcul climatisée (222 m²) partagée par plusieurs laboratoires du département de physique qui héberge nos sites Tier 2 et Tier 3 de Grille LCG (LHC Computing Grid) pour la simulation et les analyses des grandes expériences du CERN, des fermes de calcul HPC (High Performance Computing) pour le développement d'applications de simulation spécialisées, ainsi qu'une petite plateforme GridCL de R&D pour évaluer l'usage des accélérateurs multicœurs GPU (Graphics Processing Units) au sein d'une grille de calcul.

Afin que le support technique du LLR reste adapté à nos contributions aux grands projets scientifiques internationaux et qu'il puisse répondre favorablement aux diverses sollicitations dans les domaines de la mécanique, l'électronique et instrumentation et l'informatique, il est nécessaire de maintenir et développer nos compétences techniques en les adaptant aux évolutions des métiers et des technologies émergentes. Cela passe par une veille technologique et une participation active dans les réseaux métiers de l'IN2P3 et les groupes de travail mis en place par le comité européen (ECFA) dans le cadre de la feuille de route visant à structurer les efforts de R&D en Europe pour le développement d'un futur collisionneur e⁺e⁻ dans les prochaines décennies. Cela passe aussi par une identification de nos compétences actuelles et une stratégie de recrutements ciblés, couplées à des efforts de formations de nos agents et de formation d'apprentis en vue de les recruter.

En mécanique, nous devons veiller à renforcer nos compétences en

opérateurs de conduite de nos machines à commande numérique, ce que nous faisons actuellement en formant un apprenti et un jeune CDD sur crédits TGIR CMS, dans l'espoir de pouvoir au moins recruter l'un des deux. Nous sommes également en phase de recrutement d'un ingénieur mécanicien pour renforcer notre pôle de techniques de calcul par éléments finis et calculs thermiques pour les études de futurs détecteurs.

En électronique, nos compétences actuelles couvrent les domaines du test et de la caractérisation d'ASICs conçus par OMEGA ou le CEA IRFU, la conception et le routage de cartes électroniques mixtes haute densité hébergeant ces ASICs pour des systèmes complets d'acquisition et de déclenchement, avec mise en œuvre de liaisons séries haut débit et la description hardware en langages HDL (firmware) implémentés dans les composants reprogrammables FPGA. Nous souhaitons particulièrement renforcer nos compétences pour utiliser au maximum les derniers outils de simulation post-routage des cartes électroniques intégrant toutes les vérifications en termes d'intégrité de signal, consommation, dissipation et design de radiateurs personnalisés, chutes de tension sur l'ensemble d'une carte, etc. Maîtriser ces outils est pour nous essentiel afin de garantir un bon fonctionnement dès les prototypes de cartes électroniques mettant en jeu des composants et des technologies de réalisation de PCB (Circuit imprimé) de plus en plus pointus et onéreux. Un autre atout de notre groupe électronique repose sur son équipe expérimentée de designers de firmware. Aujourd'hui, tout système électronique de lecture et d'acquisition embarqué dans des expériences de physique des hautes énergies ne peut se passer des composants programmables FPGA. Ces composants gèrent tous les traitements numériques, les flots de données et offrent des possibilités de calcul intensif. Pour étendre notre palette de

compétences dans ce domaine, nous souhaitons explorer à travers une R&D, les possibilités d'intégrer dans un FPGA un processeur open source et d'étudier les performances, la compatibilité logicielle, la capacité à exécuter des tâches, la flexibilité d'utilisation, en gardant pour objectif final de pouvoir répondre aux futurs besoins des équipes de physique. De même, et on le voit dans tous nos développements firmware et logiciels pour le trigger de niveau 1 du HGAL de CMS, il est primordial de pouvoir vérifier tous ces algorithmes à un niveau supérieur à travers l'utilisation des méthodes d'UVM (Universal Verification Methodology). Nous avons la volonté de réacquérir cette compétence au sein de notre groupe suite au départ l'an dernier d'un ingénieur spécialisé en UVM, soit en formant 2 ingénieurs à cette technique, soit par le recrutement d'un nouvel ingénieur.

En informatique, notre groupe informatique a créé un groupe de travail transverse, composé de deux ingénieurs et de physiciens, dédié au Machine Learning et au développement de programmes d'analyse de données et de reconstruction basés sur l'intelligence artificielle. Vu la montée en puissance de ces technologies, il est primordial pour nous de maintenir une veille et une R&D appliquée et de continuer nos efforts en caractérisation optimisée de particules par des techniques de réseaux de neurones à convolution de graphes, en utilisation des ordinateurs quantiques pour faire du Machine Learning et en implémentation des réseaux de neurones dans des designs électroniques (FPGA), en utilisation d'auto-encodeurs, de transformers, etc). Ces activités sont déjà visibles au sein des expériences CMS et HK et seront bénéfiques à court terme au multidisciplinaire, comme le projet PEPITES, et à de futures expériences. Nous souhaitons donc accroître les activités et la visibilité de ce groupe en continuant nos développements dans les projets ANR ou master-projets IN2P3 et en recrutant

un nouvel ingénieur. Nous suivons également de près la mise en place des groupes de travail ECFA cités plus haut, notamment le DRD7 sur l'électronique et l'intelligence embarquée, afin de pouvoir y prendre part à court terme et apporter nos expertises.

Notre groupe informatique a cette année renforcé ses compétences 'online' en recrutant un nouvel ingénieur. En lien étroit avec les électroniciens, ce pôle assure le développement des programmes de pilotage des détecteurs ainsi que l'acquisition et l'analyse temps-réel des données traitées sur nos cartes électroniques. On peut souligner le développement en interne d'un framework générique open-source (Pyrame) permettant de mutualiser l'ensemble de ces développements et sa mise à niveau offrant une interface Python et Windows.

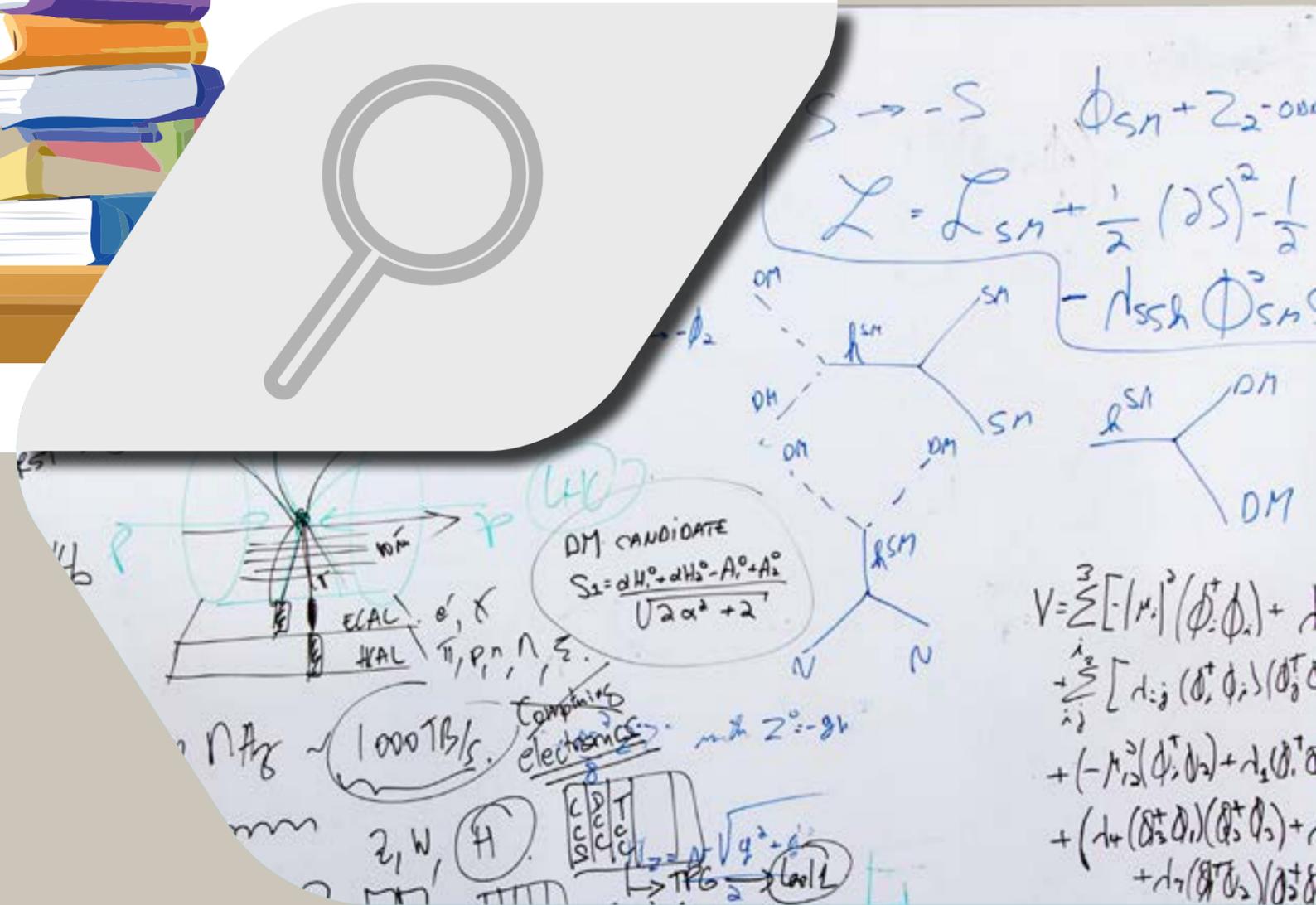
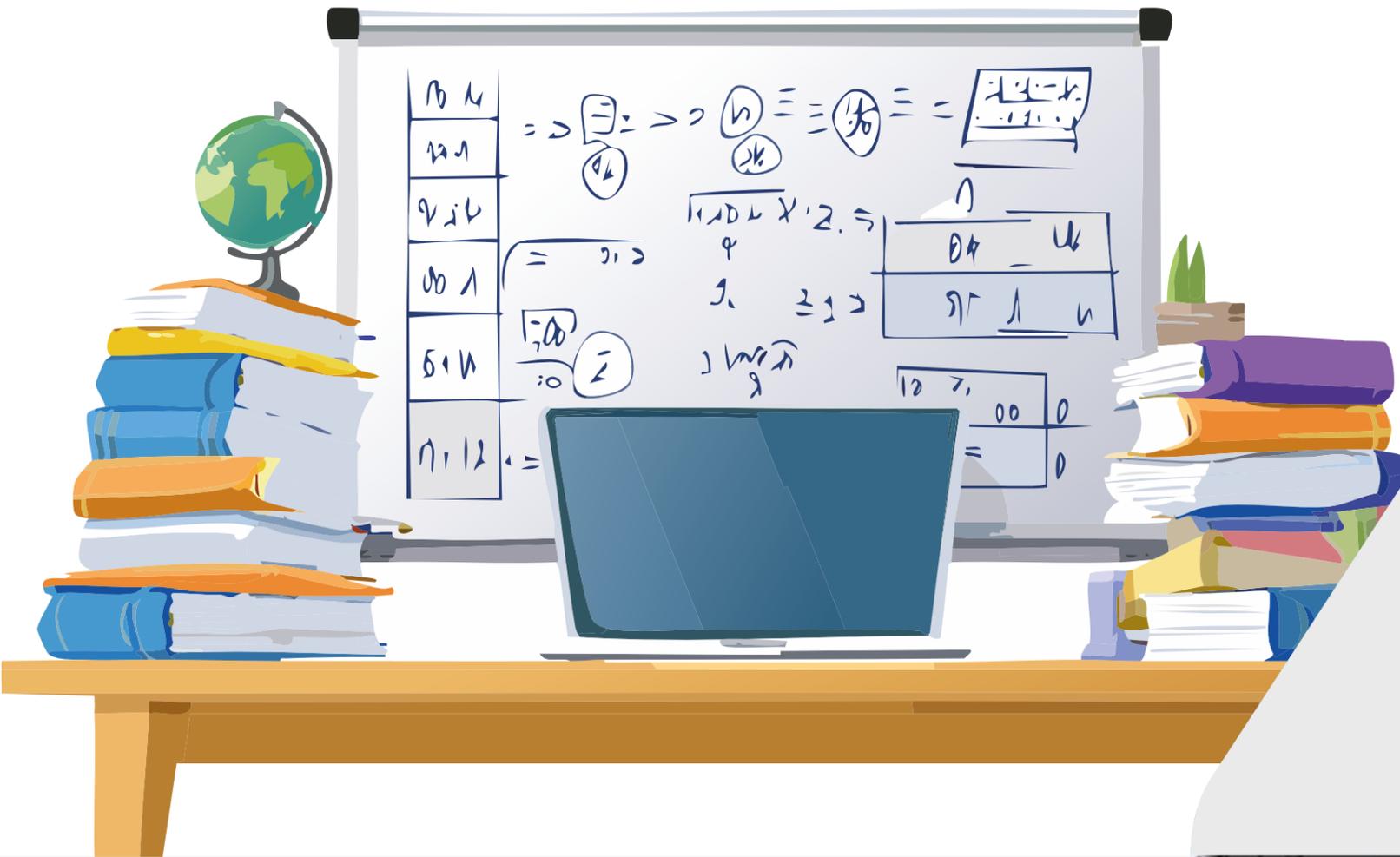
D'autre part, les infrastructures de calcul sont des outils qui deviennent de plus en plus importants au sein des collaborations de physique des particules. En effet, l'augmentation considérable de la granularité et de la taille de nos détecteurs va de pair avec une augmentation des temps de calculs nécessaires pour le traitement de leurs données, mais aussi de leur simulation. Dans ce contexte, les infrastructures de calcul du LLR ne cessent d'augmenter en capacité. De plus, de nombreuses technologies comme par exemple les GPUs et les FPGAs intégrés dans les machines rendent plus complexes les tâches de conception et d'administration de ces infrastructures. Il nous est donc indispensable de renforcer, par le recrutement d'un ingénieur, notre pôle calcul et données qui assure la dimension opérationnelle des différentes infrastructures de calcul : plateformes à haute performance, grilles de calcul et plateformes de calculs interactifs.

L'ensemble des compétences et expertises techniques actuelles, leur axe d'orientation et développement

stratégique cité ci-dessus, associés à des recrutements ciblés, doivent permettre à nos groupes techniques support à la recherche de prendre le virage des nouvelles technologies pour rester compétitifs et visibles à l'échelle IN2P3 et à l'international. Le soutien de nos tutelles en termes de recrutements et moyens financiers est un point clé dans cette perspective.



7 PRODUCTION SCIENTIFIQUE ET RAYONNEMENT



La caractérisation du LLR peut être regroupée sous 8 thèmes avec des éléments qualitatifs ou quantitatifs :

- Rayonnement ;
- Attractivité ;
- Responsabilités ;
- Contributions techniques ;
- Contributions à la physique ;
- Implication dans le tissu local ;
- Impact académique ;
- Médiation scientifique.

À ces critères plus ou moins quantifiables s'ajoutent la dynamique et la cohérence d'ensemble des activités de recherche, la qualité des projets techniques et l'ambition des objectifs de physique qui conditionnent l'implication et le dévouement des équipes.

7.1 Rayonnement du LLR

Le LLR fondé en 1936 est le plus ancien laboratoire de l'École polytechnique qui compte 14 laboratoires de physique, et le plus ancien laboratoire de physique des particules de France. Il a été pionnier dans la physique des rayons cosmiques et a été fortement impliqué dans la création du CERN il y a 70 ans. Il possède une identité propre très forte liée à ses contributions à de nombreuses découvertes majeures, dont les courants neutres avec l'expérience Gargamelle en 1973 ou plus récemment le boson de Higgs dans l'expérience CMS en 2012 (<https://50ans.in2p3.fr/timeline-llr/>). Cinq physiciens du LLR ont reçu la médaille d'argent du CNRS pour leurs contributions à la physique des ions lourds, des particules ou à l'astronomie γ : Louis Kluberg (1989), Alain Blondel (1995), Bernard Degrange (1997), Michel Gonin (2000), Yves Sirois (2014) et Mathieu de Naurois (2018). Le LLR peut s'appuyer sur un environnement académique prestigieux qui aura formé et fourni de nombreux responsables de grandes collaborations internationales, tels André Lagarrigue, fondateur de Gargamelle, Michel Della Negra, fondateur et porte-parole historique (1992 – 2006) de CMS, ou, plus récemment Mathieu de Naurois, porte-parole (2016 – 2019) de l'expérience d'astronomie-gamma H.E.S.S, ainsi que des directeurs du CERN tels Bernard Gregory (1966 – 1970) ou Robert Aymar (2004 – 2008). Le LLR compte ou a compté de nombreux responsables nationaux de grands projets internationaux (voir l'onglet Responsabilité ci-dessous) qui participent à son rayonnement.

Au fil de l'eau et à plus court terme, la visibilité et reconnaissance nationale et internationale du personnel scientifique (hors contexte interne aux grandes collaborations) peut se mesurer par exemple en termes de prix et distinctions individuelles, la prise en charge de l'organisation de colloques ou de congrès internationaux, les invitations à des présentations en conférences internationales (voir l'onglet Contributions à la physique ci-dessous), l'invitation à participer à des comités de pilotage, d'évaluation ou de revue au niveau national ou l'international, etc.), et la participation ou le pilotage de projets financés sur contrats (ANR, ERC, etc.), les prises en charge au sein de GDR de l'IN2P3, etc.. À cela vient s'ajouter le rayonnement fourni à travers les anciens doctorants et post-doctorants du LLR qui poursuivent souvent de brillantes carrières en France et à l'étranger. Citons par exemple les postes permanents dans la recherche en physique obtenus depuis 5 ans en France et à l'étranger par les posts docs Émilien Chapon et Louis Portales (CEA IRFU) (CEA IRFU), les doctorants Benjamin Quilain (CNRS LLR), Thomas Strebler (CNRS CPPM), Luca Cadamuro (CNRS IJCLab), Cristina Matin Perez (CIEMAT Madrid), Toni Sculac (Faculty U. Split) ou Matteo

Bonanomi (CNRS CPPM), et les post-doctorants Olivier Davignon (CNRS LLR) ou Émilie Maurice (Prof. École polytechnique).

Quelques indicateurs au cours des 5 dernières années :

Lauréats LLR de prix parmi les personnels scientifiques permanents :

- Arnaud BECK – Co-lauréat du Prix science ouverte du logiciel libre de la recherche 2023
- Bernard DEGRANGE – Prix Lagarrigue 2016 (SFP et Université Paris-Sud)
- Mathieu DE NAUROIS – Médaille d'argent du CNRS 2018
- Adinda DE WIT – Guido Altarelli Award 2023 ; Herta-Sponer Prize – DPG 2022
- Michel GONIN : Palmes académiques 2020 ; Médaille d'argent du CNRS 2000
- Émilie MAURICE – Médaille de bronze du CNRS 2024 ; Bourse L'Oréal-Unesco pour les femmes et la science 2017
- Christophe OCHANDO – Prix Georges Charpak de l'Académie des sciences 2014
- Catherine ROLAND – Lauréate 2023 de l'Association des Femmes de Culture-France
- Yves SIROIS – European Physical Society Fellow 2019 ; Chevalier – Ordre national du Québec 2016 – Médaille d'argent du CNRS 2014

Organisation de colloques nationaux ou de conférences internationales :

- Vincent BOUDRY – Scientific Program Committee (Calorimetry), "European Physical Society conference on High Energy Physics (EPS HEP 2021)". Scientific Program Committee (Calorimetry), "International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP'21)"
- Margherita BUIZZA-AVANZINI – Comité d'organisation du Workshop IRN Neutrino, École polytechnique, France, 23 – 24 mai 2024
- Jean-Claude BRIENT – Scientific Program, "Calorimetry for the High Energy Frontier (CHEF2019)", "Fukuoka, Japon
- Mathieu DE NAUROIS – Scientific Program, "African Conference on Fundamental Physics and Applications (ACP2018)" et "African School of Physics (ASP 2018)", Windhoek, Namibie (2018) ; "African School of Physics (ASP 2022)", Gqeberha (Afrique du Sud)
- Frédéric FLEURET – Comité d'organisation de la série de conférences – Rencontres QGP France, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021 (Étretat), 2022 (Tours), 2023, 2024 (Bagnoles de l'Orne)
- Frédéric FLEURET – Scientific Program Committee (ions lourds), International Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2018)
- Kara. MATTIOLI – Scientific Program Committee (ions lourds), International Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2024). Prague, République tchèque, 18 – 24 juillet 2024
- Émilie MAURICE – Scientific Program Committee (ions lourds), 42nd International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2024)
- Émilie MAURICE – Scientific Program Committee (ions lourds), International Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2021)
- Thomas MUELLER – Comité d'organisation du International Workshop on the evolution of advanced electronics and instrumentation for Water Cherenkov experiments, Conférence en ligne du 11 Avril 2022
- Roberto SALERNO – Co-chair, International Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2021), Paris, 2021
- Yves SIROIS – Comité d'organisation de la série de conférences internationales

"Higgs Hunting", Orsay-Paris, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022, 2023, 2024

Organisation de réunions générales de grandes collaborations internationales :

- Philippe BRUEL – FERMI Collaboration Meeting – École polytechnique – mars 2023
- Michel GONIN – T2K Collaboration Meeting – École polytechnique, juillet 2019
- Christophe OCHANDO – CMS Collaboration Meeting – St Malo, avril 2023

Organisation d'Écoles de Physique :

- Stephen FEGAN, Deirdre HORAN, Thomas MUELLER – Comité scientifique, "Rencontres de l'infiniment grand à l'infiniment petit", Orsay, Palaiseau, Paris, Saclay, 2022 (Promotion R. Feynman), 2023 (Promotion H.S. Leavitt), 2024 (Promotion E. Fermi et D. Hilbert)
- Stephen FEGAN, Deirdre HORAN – Comité scientifique, "Rencontres de l'infiniment grand à l'infiniment petit", Orsay, Palaiseau, Paris, Saclay, 2019 (Promotion Vera Rubin)
- Deirdre HORAN, Alexandre ZABI – Comité scientifique, "Rencontres de l'infiniment grand à l'infiniment petit", Orsay, Palaiseau, Paris, Saclay, 2018 (Promotion Chien-Shiung Wu)
- Vincent BOUDRY – Comité national de coordination de "l'École de Gif", 2020, 2021, 2022, 2023, 2024

Projets financés sur contrats, actifs entre 2018 – 2023 :

Contrats européens :

- AIDAInnova - Advancement and Innovation for Detectors at Accelerators (Vincent BOUDRY)
- ERC QCD (2021 – 2026) at High Densities (Leticia CUNQUEIRO / Matthew NGUYEN)
- EuPRAXIA – Preparatory Phase (Arnd SPECKA)
- I.FAST - Innovation fostering in Accelerator Science and Technologies (Arnd SPECKA)
- SK2HK - From Super-Kamiokande to Hyper-Kamiokande (Olivier DRAPIER)
- STRONG – 2020 – The strong interaction at the frontier of knowledge: fundamental research and applications (Raphaël GRANIER DE CASSAGNAC)

Contrats nationaux :

- ANR COHERE (> 2024) – Constraints from Higgs and Electroweak sector measurement results on EFT at the LHC (Adinda DE WIT)
- ANR Coldloss (2018 – 2024) – Perte d'énergie de parton dans la matière QCD froide (François ARLÉO)
- ANR CALO-5D – Calorimetry in five dimensions (Vincent BOUDRY)
- ANR CAVERNS (> 2024) – CP Asymmetry discovery with an enhanced reconstruction algorithm for neutrinos in Super- and Hyper-Kamiokande
- ANR HiGranTS (2018 – 2022) – Systèmes de déclenchement pour détecteurs ultra-granulaires dans des environnements de HE et de HL (Jean-Baptiste SAUVAN)
- ANR HOTSHOWERS (2016 – 2022) – Modification des gerbes partoniques dans le plasma de quarks et gluons (Matthew NGUYEN)
- ANR MOTS – Observations multi-messagers du ciel transitoire (Deirdre HORAN)
- ANR OGCID – Convolution optimale de graphes pour l'identification efficace de particules (Frédéric MAGNIETTE)
- ANR PEPITES (2017 – 2022) – Moniteur ultra-mince pour faisceau de particules

chargées (Christophe THIEBAUX)

- ANR STORM (via CPJ) – Structure et origine de la matière aux deux infinis (Yves SIROIS)
- ANR T-Calo – Timing in Calorimeters (Vincent BOUDRY)
- ANR THERMOfixed – Mesurer la température du déconfinement avec la cible fixe de l'expérience LHCb (Émilie MAURICE)
- Pré-maturation sur subvention IPP SPLIF – Simple Moniteur pour Intensité Flash (Christophe THIEBAUX)
- Subvention MESR GT NUM – Groupe thématique numérique : activités pédagogiques proposées en classes de lycée par la création de jeu vidéo (Catherine ROLLAND)

Contrats financés dans de cadre de programmes d'investissements d'avenir (PIA)¹ :

- LabEx P2IO 1^{er} Voyage pédagogique M2 HEP au CERN – Pascal PAGANINI
- LabEx P2IO 2^{ème} Voyage pédagogique M2 HEP au CERN – Pascal PAGANINI
- LabEx P2IO ACP – Gilles GRASSEAU
- LabEx P2IO CANEVAS – Stephen FEGAN
- LabEx P2IO CCQE Cross-section measurement at ND280 – Margherita BUIZZA-AVANZINI
- LabEx P2IO CDD Post-doc Analyses Higgs – Christophe OCHANDO
- LabEx P2IO CDD Post-doc HGAL – Amina ZGHICHE
- LabEx P2IO DataNG – Pascale HENNION
- LabEx P2IO Incubation Quark Touch – Raphaël GRANIER DE CASSAGNAC
- LabEx P2IO Kepler Music Projet – François ARLÉO
- LabEx P2IO LudoParticules (médiation scientifique par le jeu) – Émilie MAURICE
- LabEx P2IO M2 Physique des Hautes Énergies – Pascal PAGANINI
- LabEx P2IO MasterClass 2020 – Christophe THIEBAUX
- LabEx P2IO MasterClass 2018 – Christophe THIEBAUX
- LabEx P2IO PEPITES – Marc VERDERI
- LabEx P2IO Post-doc BSM Nu (Neutrinos) – Margherita BUIZZA-AVANZINI
- LabEx P2IO Post-doc GLUODYNAMICS (ions lourds) – Frédéric FLEURET
- LabEx P2IO Post-doc GLUODYNAMICS (ions lourds) – Matthew NGUYEN
- LabEx P2IO Post-doc LHCb – Frédéric FLEURET
- LabEx P2IO Post-doc SMILEI – Particle-in-cell code for laser plasma – Arnaud BECK
- LabEx P2IO Projet emblématique HIGHTEC (2016 – 2019) – Yves SIROIS
- LabEx P2IO QCD MasterClass 2022 – François ARLÉO
- LabEx P2IO QCD MasterClass 2021 – François ARLÉO
- LabEx P2IO QCD MasterClass 2019 – François ARLÉO
- LabEx P2IO Subvention Émilie du Châtelet – Vincent BOUDRY
- LabEx P2IO Subvention Émilie du Châtelet – Giacomo ORTONA
- LabEx P2IO Subvention Émilie du Châtelet – Yves SIROIS
- LabEx P2IO Subvention pour la 51^e édition de l'École de Gif (2019) – Vincent BOUDRY
- LabEx P2IO Subvention pour la Conférence LHC Physics – Yves SIROIS

Il est à souligner que le LabEx de l'Université Paris-Saclay a constitué une importante source de financement pour le LLR pendant une dizaine d'années. Il aura permis de faire émerger plusieurs projets majeurs dont par exemple le projet de calorimètre haute granularité HGAL de CMS grâce au projet emblématique HIGHTEC (High Granularity Hybrid Time-Energy). Ce même projet HIGHTEC (ou HGCF) a alimenté

¹ L'École polytechnique s'est séparée de l'Université Paris-Saclay et les possibilités de financements via le LabEx P2IO ont pris fin au LLR en 2022.

par ailleurs le projet HGTD pour ATLAS et la R&D CALICE pour un futur collisionneur e⁺e⁻. HGCAL et HGTD sont aujourd'hui des projets majeurs d'upgrade de CMS et ATLAS respectivement pour HL-LHC. Le LabEX aura aussi permis de lancer le projet de profileur de faisceaux PEPITES, les études de polarisation du projet HARPO de Denis Bernard qui trouve aujourd'hui des suites innovantes avec Fermi-LAT, et fortement soutenu les recherches en physique hadronique (dans LHCb, pour CMS et pour la phénoménologie) ou en physique des neutrinos en complément des moyens du CNRS à l'IN2P3.

Prises en charge dans des GDR de l'IN2P3 et IRN entre 2018 – 2023 :

Si les scientifiques du LLR participent aux activités de plusieurs Groupements de Recherche (GDR) et International Research Networks (IRN), ils y assument aussi des responsabilités.

- Arnaud BECK – GDR APPEL Accélérateurs Plasma Pompés par Laser – Co-responsable de l'axe Modélisation et simulation (> 2023)
- Frédéric FLEURET – Co-direction du GDR QCD – Chromodynamique Quantique (2015 – 2020)
- Émilie MAURICE – GDR QCD – Chromodynamique Quantique – Co-responsable de l'axe Prospectives sur les observables de l'interaction forte (2020 – 2023)
- Matthew NGUYEN – GDR QCD – Chromodynamique Quantique – Co-responsable de l'axe Prospectives sur les observables de l'interaction forte (≥ 2023)
- Matthew NGUYEN – GDR QCD – Chromodynamique Quantique – Co-responsable de l'axe Sondes dures et hadronisation des jets (2015 – 2020)
- Christophe OCHANDO – IRN Terascale – Co-responsable de l'axe Higgs & Electroweak (> 2014)
- Pascal PAGANINI – GDR DUφ (Deep Underground Physics) Membre du "GDR scientific management committee" depuis 2022
- Arnd SPECKA – GDR APPEL Accélérateurs Plasma Pompés par Lasers – Co-responsable de l'axe activités expérimentales (> 2023)

Des membres du LLR ont été par ailleurs activement impliqués dans les exercices de prospective de l'IN2P3 entre 2020 et 2022.

- Olivier DRAPIER – Comité de pilotage du Groupe Thématique GT12 – Applications Associés : géosciences, système solaire et milieu interstellaire
- Olivier DRAPIER – Comité de pilotage du Groupe Thématique GT13 – Ressources humaines et financières
- Frédéric FLEURET – Comité de pilotage du Groupe Thématique GT03 – Physique hadronique
- Berrie GIEBELS – Responsable du Groupe Thématique GT05 – Physique de l'inflation et énergie noire
- Berrie GIEBELS – Responsable du Groupe Thématique GT06 – Physique des neutrinos et matière noire
- Christophe OCHANDO – Comité de pilotage du Groupe Thématique GT01 – Physique des particules

7.2 Attractivité du LLR

Il s'agit de la capacité à attirer les meilleur(e)s jeunes scientifiques français et étrangers. La cohérence des projets et l'ambition scientifique est un facteur décisif. Une des forces d'un laboratoire comme le LLR impliqué dans de grands projets internationaux est la possibilité d'appuyer des axes de recherche majeurs sur plusieurs générations de

doctorants et de post-doctorants pour se retrouver sur le devant de la scène mondiale. L'attractivité du LLR peut se mesurer par exemple par la diversité et la richesse des profils de post-docs et doctorant(e)s mais aussi à travers la visibilité donnée par des marques de reconnaissances au sein des grands projets (prix de collaboration, prix de thèse, etc.) et l'irrigation académique (poursuite des activités de recherche au niveau national ou international).

Le LLR qui compte environ 30 physiciens permanents² attire un grand nombre de doctorants et post-doctorants français et étrangers. Cela repose sur la qualité et la visibilité de ses équipes au sein des grandes expériences, mais aussi le prestige de l'environnement académique à l'École polytechnique sur le campus de l'Institut Polytechnique de Paris (IPP) ainsi que sur son Master HEP commun avec ETH Zurich. Le ratio entre les permanents et les doctorants ou post-doctorants du LLR est environ de 1 pour 1, soit deux fois supérieur à la moyenne au CNRS.

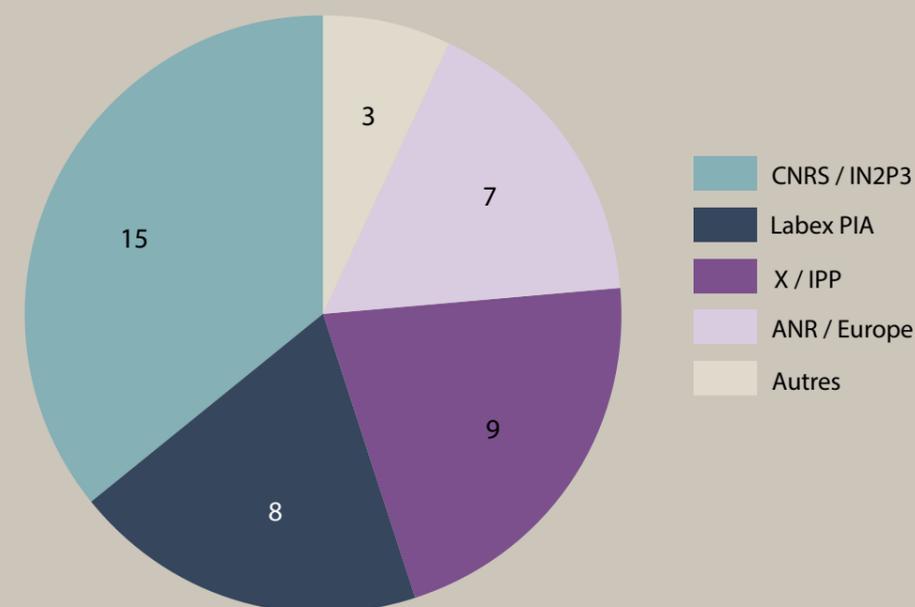
Doctorants et post-doctorants internationaux :

Sur les 25 doctorant(e)s présents au LLR au début septembre 2024 (dont deux polytechniciens), 7 sont français et les autres proviennent de 12 pays différents (Algérie, Brésil, Chine, Colombie, Croatie, Cuba, Grèce, Inde, Italie, Moldavie, Portugal, et USA).

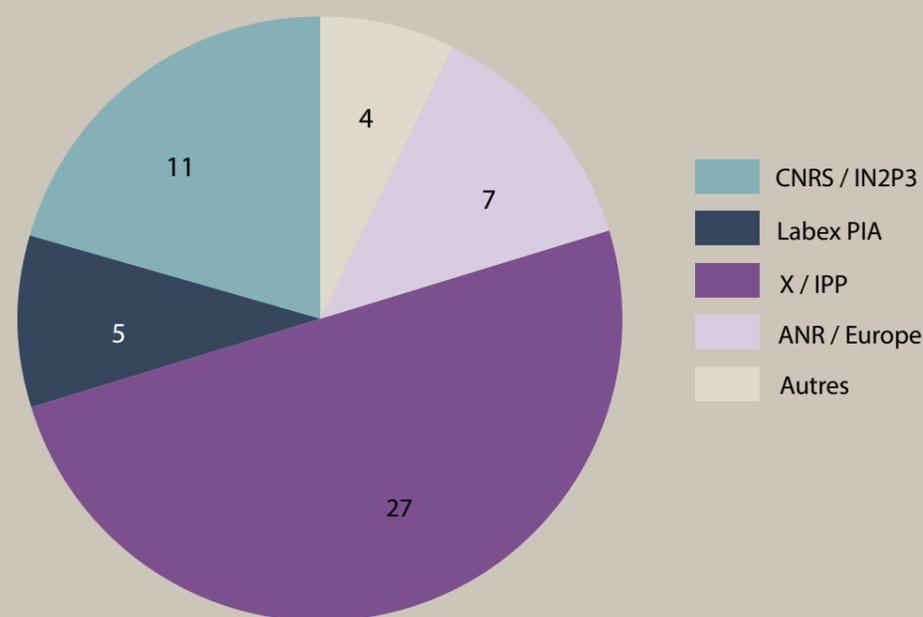
Bruno Alves – Portugais, Juliette Authier – Française, Antoine Beauchêne – Français, Denis Carabadjac – Moldave, Marco Chiusi – Italien, Théo Cuisset – Français, Julia De Assis Scarpin – Brésilienne, Trisha Debnath – Indienne, Isaac Ehle – Américain, Bharadwaj Harikrishnan – Indien, Lida Kapoliti – Grecque, Geliang Liu – Chinois, Samantha Lopez Perez – Cubaine, Qiuchan Lu – Chinoise, Martina Manoni – Italienne, Mathieu Mellenec – Français, Andres Munoz Ricardo – Colombienne, Léna Osu – Française, Andro Petkovic – Croate, Christine Quach – Française, Gabriel Ricart – Français, Andrew Santos – Américain, Ana Sculac – Croate, Wassim Si Said – Algérien, Elena Vernazza – Italienne.

² L'écriture exclusive est utilisée ici par soucis de simplification du texte. Le laboratoire soutient fortement la diversité et l'équilibre des genres et des sexes au sein de son personnel.

Origine des financements des post-doctorants



Origine des financements des doctorants



Prix de thèse et prix de collaboration

Le LLR s'enorgueillit de nombreux prix de thèse prestigieux. Pour exemple, la collaboration internationale CMS qui compte 247 instituts ou laboratoires de 57 pays décerne en moyenne 2 prix de thèses chaque année sélectionnées parmi environ 350 thèses de doctorat produites chaque année. Le LLR est le laboratoire parmi les 247 qui a reçu le plus de prix de thèse CMS depuis sa création en l'an 2000. Le LLR a reçu en effet 7 prix de thèse, dont 3 dans les 5 dernières années : Ivica Puljak (2000), Chiara Rovelli (2006), Lorenzo Bianchini (2013), Luca Cadamuro (2017), Cristina Martin Perez (2020), Matteo Bonanomi (2021), Jona Motta (2023). Toutes et tous poursuivent ou ont poursuivi des carrières brillantes en recherche de physique fondamentale dans des laboratoires français ou étrangers .

Liste complète des prix de thèse au cours des 6 dernières années (2018 – 2023) :

- Jaafar CHAKRANI (Neutrino T2K) – PI Paris Best Thesis Award 2023
- Jona MOTTA (CMS – CMS Best Thesis Award 2023
- Guillaume FALMAGNE (CMS) – IP Paris Best Thesis Award 2022
Prix de thèse du GDR QCD 2022
- Matteo BONANOMI (CMS) – CMS Best Thesis Award 2021
- Cristina MARTIN PEREZ (CMS) – CMS Best Thesis Award 2020
- Janeth VALVERDE – Prix de thèse 2020 du LabEx P2IO
- Thomas STREBLER – (CMS)) – Prix 2018 école doc. PHENIIC (Paris-Saclay)

Autres prix de collaborations internationales (2018 – 2023) :

- Oscar BOENTE (LHCb) – LHCb Early Career Scientist Award 2024
- Kara MATTIOLI (LHCb) – LHCb Early Career Scientist Award 2024
- Adinda DE WIT (CMS HEP) – CMS Young Researcher Prize 2023
- Arnaud BECK (SMILEI) – Prix du logiciel libre MESR 2023
- Amina ZGHICHE (CMS HEP) – CMS Achievement Award (ECAL) 2023
- Jona MOTTA (CMS HEP) – CMS Achievement Award (L1 trigger) 2023
- Elena VERNAZZA (CMS HEP) – CMS Achievement Award (HGCAL) 2023

- Halim ASHKAR (H.E.S.S.) – H.E.S.S. Prize 2021 ("for exceptional contributions")
- Luca CADAMURO (CMS HEP) – CMS Achievement Award (L1 trigger) 2019
- Jonas REMBSER (CMS HEP) – CMS Achievement Award (Off. Computing) 2019
- Matthew NGUYEN (CMS ions lourds) – CMS Young Researcher Prize 2018

Visiteurs étrangers

Le LLR reçoit occasionnellement pour des durées d'un ou quelques mois des scientifiques étrangers sur divers programmes d'un ou quelques mois de l'École polytechnique. En 2024, le laboratoire reçoit ainsi :

- Maria Hermida CEPEDA (CMS HEP) CIEMAT : Chercheurs invités seniors 2024 – 2025
- Reshmi MUKHERJEE (Astro-γ) : University of Columbia Alliance visiting professorship 2024 – 2025

7.3 Prises de Responsabilités

Il s'agit ici principalement des responsabilités au sein de grands projets internationaux (management central, responsabilité de sous-détecteurs ou de sous-système d'une grande expérience, etc.), mais aussi au sein des instances scientifiques nationales.

La mesure de l'impact de ces responsabilités est relativement facile à mesurer en interne dans une grande expérience, mais très difficile en externe du fait de l'inhomogénéité des titres et fonctions. Les niveaux d'engagements et de responsabilités pour une appellation donnée varient considérablement d'une thématique à l'autre, voire d'une expérience à l'autre dans un même domaine, entre les quatre expériences du CERN par exemple. Ici nous utilisons la nomenclature inspirée de CMS.

- Les responsabilités de niveau 1 (N1) correspondent à l'encadrement supérieur dans un grand projet impliquant par exemple un siège au management board ou au executive board de la collaboration.
- Les responsabilités de niveau 2 (N2) sont transverses à toute la collaboration (responsabilité majeure au sein d'un projet de sous-détecteur, responsabilité d'une branche complète d'analyse comme par exemple les analyses "Higgs" dans CMS ou "Neutrino Oscillations" dans T2K, etc.
- Les responsabilités de niveau 3 (N3) correspondent aux responsabilités de sous-groupes de physique spécialisés ou d'éléments spécifiques de sous-détecteurs.
- Les responsabilités de niveau 4 (N4) aux responsabilités d'algorithmes ou de tests techniques spécifiques. Ici j'utilise une correspondance avec la nomenclature CMS pour les autres projets.

En plus des responsabilités au sein des grands projets, le LLR compte ou a compté de nombreux responsables nationaux de grands projets internationaux. Pour exemples historiques, des physiciens du LLR ont assumé la responsabilité du projet CMS et représenté la France pour CMS dans les instances de l'expérience et du CERN de 1992 à 2016 (Jean Badier 1992 – 1999, Ludwik Dobrzanski 1999 – 2006, Yves Sirois 2006 – 2017), puis de nouveau, à partir de fin 2024, Florian Beaudette. Jean-Claude Brient a été Spokesperson de la Collaboration CALICE de 2002 à 2008. Gérard Fontaine a été Chair du H.E.S.S. Collaboration Board de 2005 à 2014, etc. Cela se poursuit aujourd'hui avec : Philippe Bruel, responsable national IN2P3 pour Fermi depuis 2013, Mathieu de Naurois responsable national IN2P3 pour le projet H.E.S.S. depuis 2013, Stephan Fegan responsable scientifique pour le projet CTA à l'IN2P3 (2020 – présent) et président de CTA-France (> 2023). Benjamin Quilain est le responsable IN2P3 pour le projet HK depuis 2021. Thomas Mueller est le responsable national SK depuis 2020. Matthew Nguyen est responsable calcul pour le projet CMS-France depuis 2013.

Quelques indicateurs de prises de responsabilité au cours des 5 dernières années :

- N1 Deirdre HORAN – CTA President of the Publication Board (SAPO) 2023
- N1 Deirdre HORAN – Fermi-LAT Analysis Coordinator – 03/2023 à 03/2024
- N1 Deirdre HORAN – Fermi-LAT Deputy Analysis Coordinator – 03/2022 à 03/2023
- N1 Mathieu JACOBE DE NAUROIS – H.E.S.S. Deputy Spokesperson > 2019
- N1 Mathieu JACOBE DE NAUROIS – H.E.S.S. Spokesperson (P.I.) de la Collaboration 2016 à 2019
- N1 Alexandre ZABI – CMS L1 Trigger Project Leader – 09/2020 à 09/2024
- N2 Halim ASHKAR – H.E.S.S. "Secretary for transitory events"
- N2 Benjamin AUDURIER – LHCb Convener – Ion & Fixed Target Working Group, 2019 à 2020
- N2 Margherita BUIZZA AVANZINI – T2K Cross sections working group
- N2 Vladislav BALAGURA – LHCb Luminosity Working Group Coordinator – 2019 à 2024
- N2 Philippe BRUEL – Fermi-LAT Convener Calibration and Analysis > 2019
- N2 Olivier DAVIGNON – CMS L1 Trigger Detector Performance Group – 09/2018 à 09/2020
- N2 Adinda DE WIT – CMS Higgs Physics Analysis Group – 09/2022 à 09/2024
- N2 Adinda DE WIT – LHC Higgs Combination Group convener (≥ 2024)
- N2 Frédéric FLEURET – LHCb Convener – Ion & Fixed Target Working Group < 2019
- N2 Gérard FONTAINE – H.E.S.S. Vice-président du Steering Committee 2016 à 2022
- N2 Shamik GHOSH - E/γ reconstruction convener – 09/2022 à 09/2024
- N2 Andrew GILBERT – CMS Standard Model Analysis Group – 09/2022 à 09/2024
- N2 Raphaël GRANIER DE CASSAGNAC – Heavy-ion Publication Committee Chair – 2022 à 2024
- N2 Deirdre HORAN – CTA Member of the SAPO – 07/2019 à 2023
- N2 Deirdre HORAN – Fermi-LAT Convener Extragalactic / multimessenger 2020 à 2022
- N2 Inna KUCHER – CMS ECAL Trigger-DAQ
- N2 Émilie MAURICE – LHCb Luminosity Working Group Coordinator – 2017 à 2019
- N2 Matthew NGUYEN – Coordinator of CMS Heavy-ion Program and Runs (≥ 2019)
- N2 Matthew NGUYEN – Reconstruction convener / Offline release planning – 09/2022 à 09/2024
- N2 Pascal PAGANINI – HK Conception et opération des bancs de test d'acquisition
- N2 Thomas PIERRE-ÉMILE – CMS HGCAL coordinator for mechanics CE-E (Ecal) (≥ 2018)
- N2 Benjamin QUILAIN – HK Convener Reconstruction
- N2 Benjamin QUILAIN – T2K Neutrino Oscillations physics working group
- N2 Roberto SALERNO – Higgs Physics Analysis Group convener – 09/2018 à 09/2020
- N2 Jean-Baptiste SAUVAN – CMS HGCAL Backend Trigger & DAQ (≥ 2024)
- N2 Alexandre ZABI – CMS L1 Trigger Phase 2 Upgrade Coordinator – 09/2018 à 09/2020
- N2 Amina ZGHICHE – CMS Ecal Run Coordinator – 09/2022 à 09/2024
- N2 Amina ZGHICHE – ECAL Detector Performance Group – 09/2019 à 09/2021
- N3 Halim ASHKAR – CTA Coordinator of the NectarCam scientific software
- N3 Cristian BALDENEGRO – CMS HIN Pag Forward Physics (2021 – 2023)
- N3 Cristian BALDENEGRO - Convener of heavy-ion forward group - 2023-2024
- N3 Florian BEAUDETTE – CMS Membre ex-officio du Collaboration Board de CMS
- N3 Giacomo BOLDRINI – CMS Coordinateur EFT Forum (≥ 2024)
- N3 Margherita BUIZZA AVANZINI – HK Membre du Speakers Board

- N3 Alessandra CAPATTI – CMS@LHC Higgs Cross-section Working Group
- N3 Alessandra CAPPATI – HZZ subgroup convener – 09/2021 à 09/2023
- N3 Florian DAMAS – Convener of heavy-ion dilepton group – 2023 à 2024
- N3 Trisha DEBNATH – CMS Deputy Chair of the Young Scientists Committee
- N3 Olivier DRAPIER – T2K sFGD Electronic Group Convener
- N3 Raphaël GRANIER de CASSAGNAC – CMS@LHC Heavy Ion Steering Committee member
- N3 Arthur LOBANOV – CMS System tests HGCAL
- N3 Thomas MUELLER – HK Membre du Publication Board
- N3 Thomas MUELLER – HK Responsable de la base de données au CERN
- N3 Thomas MUELLER– SK Membre ex-officio du Country Board
- N3 Christophe OCHANDO – CMS HGCAL Cassettes engineering (≥ 2018)
- N3 Jean-Baptiste SAUVAN – CMS HGCAL TPG Simulation & Algorithms coordinator – 2018 à 2023
- N3 Yves SIROIS – CMS HGCAL Steering Group member
- N4 Louis PORTALES – Higgs trigger contact – 09/2022 à 09/2024

7.4 Contributions techniques du LLR

Il s'agit des contributions techniques en amont des grands projets expérimentaux (conception et construction mécanique de détecteurs, électronique de lecture ou de déclenchement, algorithmes central de reconstruction) sur le chemin critique des sujets majeurs de physique et en cohérence avec les motivations des groupes de physique du laboratoire. Elles fournissent un avantage stratégique, en particulier pour les premières prises de données et les découvertes (souvent) précoces dans les nouvelles expériences. Ces contributions sont fonction de la qualité et la cohérence des équipes techniques entretenues localement, et reconnues comme telles au sein des grandes collaborations, de la qualité des équipements (machine outils, salles blanches, salles de tests électroniques, ferme de calcul). Elles nécessitent de suivre les évolutions des technologies et les méthodologies expérimentales, puis de les intégrer dans des dispositifs complexes, assurant ainsi un positionnement à l'avant-garde de la recherche. Ce savoir-faire, reconnu au sein des collaborations internationales renforce le rôle de leader technologique de nos équipes, et contribue directement au rayonnement national et international d'un laboratoire comme le LLR.

Les prises de responsabilités dans les grands projets dépendent ultimement du soutien en ressources humaines des tutelles, des capacités financières et du partage de tâches au niveau national (IN2P3). La maîtrise des technologies émergentes et l'implication dans des projets d'envergure mondiale garantissent la visibilité et l'influence des laboratoires de l'IN2P3 dans les plus grandes avancées scientifiques actuelles.

En plus des grands projets internationaux, le LLR veille à soutenir des programmes multidisciplinaires avec une implantation locale forte et qui permettent de mieux s'insérer dans le tissu de recherche sur le campus hôte (voir l'onglet Implication dans le tissu local ci-dessous).

Contributions techniques du LLR aux projets en cours :

CMS

- Conception, réalisation du système de déclenchement (L1 Trigger) du ECAL pour les prises de données au LHC ; commissioning, opération et maintenance.
- Conception mécanique (alvéoles) pour les cristaux de PbWO₄ du ECAL (LHC)
- Tests des cartes d'électroniques d'acquisition du ECAL (LHC).

- Création au sein de CMS projet d'upgrade HGAL pour les prises de données à très haute luminosité (HL-LHC).
- Conception mécanique du CE-E (ECAL) du HGAL (HL-LHC) en collaboration avec le groupe CMS du CERN.
- Réalisation mécanique des cassettes de lecture du CE-E avec refroidissement actif diphasique (CO₂).
- Tests de caractérisation et de production des ASICs HGCROC conçus par le laboratoire OMEGA pour HGAL.
- Conception de wagons de routage des données du HGAL à HL-LHC.
- Conception et algorithmes de déclenchement embarqués sur FPGA pour le HGAL à HL-LHC.

T2K/SK/HK

- Conception mécanique du détecteur WAGASCI pour T2K.
- Conception et tests de l'électronique frontale et d'acquisition (DAQ) de WAGASCI ; installation et commissioning au Japon.
- Cartes d'électronique frontale pour le sFGD du détecteur proche ND280 de T2K en collaboration avec l'Université de Genève.
- Contributions à la rénovation de la cuve de SK en vue des prises de données avec gadolinium.
- R&D et proposition pour une électronique performante de lecture (digitisation et contrôle) pour l'expérience HK utilisant un nouvel ASIC HKROC conçu avec le laboratoire OMEGA.
- Conception du système de tests au CERN pour la chaîne d'électronique de HK.

FERMI/H.E.S.S./CTA

- Conception et fabrication de matériel de vol pour Fermi-LAT au travers de la construction de la structure du calorimètre, préparation des algorithmes et des infrastructures d'analyse ; tests en faisceau, notamment au CERN.
- Conception, fabrication et maintenance de la mécanique pour H.E.S.S. des 4 caméras des télescopes de 12 m et de la caméra du grand télescope de 28m.
- Conception et suivi de production de la mécanique des caméras NectarCAM pour les 9 Medium Size Télescopes (MSTs) de CTA.

En plus des contributions au hardware, le LLR est fortement impliqué dans la simulation, la reconstruction de données, et les développements de logiciels d'analyses de chacun des grands projets.

Les ingénieurs du LLR participent activement aux réseaux d'experts de l'IN2P3 en électronique, mécanique, informatique et management (TEAMLAB).

7.5 Contributions à la physique

Le LLR s'appuie sur des contributions originales et cohérentes à un ensemble de résultats scientifiques au sein des grands projets expérimentaux (méthodes originales de reconstruction et d'analyses, auteurs principaux d'articles). Une spécificité d'un laboratoire comme le LLR est sa capacité à développer en continuité, sur plusieurs générations de thésards et de post-doc, des contributions originales ciblées sur certains sujets de premier plan pour acquérir une expertise reconnue au niveau mondial. Cela permet à un laboratoire à taille humaine comme le LLR, avec un personnel d'une centaine de personnes (1/3 physiciens permanents, 1/3 ingénieurs et techniciens, 1/3 doctorants et post-doctorants) de se focaliser sur des sujets de premiers plans avec une forte visibilité sur la scène internationale, tout en conservant une grande flexibilité.

Quelques sujets de physique de premier plan au LLR :

- Recherche, découverte et caractérisation du boson de Higgs dans CMS.
- Production de paires HH et recherche de l'auto-couplage du boson de Higgs (couplage tri-linéaire λ_{HHH}) dans CMS et forme du potentiel du champ scalaire relié à la densité d'énergie du vide ; contrainte sur le couplage quartique λ_{WWHH} .
- Diffusion di-boson et couplages anormaux des bosons électrofaibles dans CMS ; tests d'unitarisation du Modèle Standard ; recherche de nouvelle physique et contraintes par Effective Field Theories (EFTs).
- Oscillations des neutrinos et recherche de la violation CP, liée à l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers, avec l'expérience T2K.
- Recherche du fond diffus de neutrinos de supernova (DSNB) dans l'expérience SK.
- Caractérisation du plasma de quarks et de gluons dans les collisions ions lourds avec LHCb (sur cible fixe) et CMS (mode collisionneur) ; transport de la charge de couleur dans la matière nucléaire à haute densité et haute température.
- Découverte et analyse d'objets ou événements violents à l'origine de signaux transitoires de hautes énergies en astronomie-gamma.

Les scientifiques du LLR contribuent fortement au rayonnement de la physique avec environ 375 présentations en conférences internationales en sessions parallèles ou comme conférenciers invités en session plénière sur la période de 5 ans entre 2019 et 2023, incluant dans les principales conférences de rang mondial dans chacune des thématiques de physique du laboratoire (physique des particules, physique hadronique et des ions lourds, physique des neutrinos, astronomie-gamma). Le LLR comptabilise par ailleurs environ 1125 publications dans des revues scientifiques avec comité de lecture au cours de la même période.

Une liste complète et exhaustive des publications du LLR peut être aisément reconstituée via iNSPIRE (<https://inspirehep.net/>). Le laboratoire Leprince-Ringuet y est reconnu par deux identifiants (902786 et 2093673) et les publications des physiciens et physiciennes du laboratoire sont sélectionnées en ajoutant dans la commande de recherche : "and **affid(902786;2093673)**". La liste des personnels présents au laboratoire au cours de la période concernée par le présent rapport d'activité et pour chaque domaine d'activité est donnée dans le texte. Il est utile ici de citer explicitement certaines des contributions majeures des groupes du LLR à des publications de grandes collaborations internationales, soit pour des analyses spécifiques, soit en tant qu'auteur principal. Par domaine de physique, citons par exemple :

Physique des Hautes Énergies

Measurement of the Higgs boson mass and width using the four-lepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV, CMS Collaboration, submitted to Physical Review D. (September 2024) 53 pp.

High-precision measurement of the W boson mass with the CMS experiment at the LHC, submitted to Nature (December 2024) 71 pp.

Evidence for the Higgs boson decay to a Z boson and a photon at the LHC, CMS Collaboration, Physical Review Letters 132 (2024) 021803.

Timing Performance of the CMS High Granularity Calorimeter Prototype, CMS HGAL Collaboration, Journal of Instrumentation 19 (2024) P04015.

Software Compensation for Highly Granular Calorimeters using Machine Learning, Journal of Instrumentation, CALICE Collaboration, Journal of Instrumentation 19 (2024) P04037.

Shower separation in five dimensions for highly granular calorimeters using machine learning, CALICE Collaboration, Journal of Instrumentation 19 (2024) 10, P10027.

Search for nonresonant Higgs boson pair production in final state with two bottom quarks and two tau leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS Collaboration; Physics Letters B 842 (2023) 137531.

A search for decays of the Higgs boson to invisible particles in events with a top-antitop quark pair or a vector boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS Collaboration, European Physical Journal C 83 (2023) 933.

Measurements of inclusive and differential cross sections for the Higgs boson production and decay to four-leptons in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS Collaboration, Journal of High Energy Physics 08 (2023) 040.

Performance of CMS High Granularity Calorimeter Prototype to Charged Pion Beams of 20–300 GeV/c, CMS HGAL Collaboration, Journal of Instrumentation 18 (2023) P08014.

Measurement of the Higgs boson width and evidence of its off-shell contributions to ZZ production, CMS Collaboration, Nature Physics 18 (2022) 11, 1329-1334.

A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery, CMS Collaboration, Nature vol. 607 (2022) pp. 60–68.

Response of a CMS HGAL silicon-pad electromagnetic calorimeter prototype to 20–300 GeV positrons, CMS HGAL Collaboration, Journal of Instrumentation 17 (2022) P05022.

Evidence for electroweak production of four charged leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS Collaboration, Physics Letters B 812 (2021) 135992.

Measurement of production cross sections of the Higgs boson in the four-lepton final state in pp collision at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS Collaboration, European Physical Journal C 81 (2021) 488.

Performance of the CMS Level-1 trigger in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS Collaboration, Journal of Instrumentation 15 (2020) P10017.

The Phase 2 Upgrade of the CMS Level-1 Trigger (2020), TDR CERN-LHCC-20-2020-004 (2020).

Physique hadronique et des ions lourds

Girth and groomed radius of jets recoiling against isolated photons in lead-lead and proton-proton collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, CMS Collaboration (May 2024), published in Physics Letters B 861 (2025) 139088, 30 pp.

Observation of double J/ψ meson production in p Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, CMS Collaboration, Physical Review D 110 (2024) 9, 092002, 41 pp.

Measurement of the primary Lund jet plane density in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, CMS Collaboration, Journal of High Energy Physics 05 (2024) 116.

Charmonium production in pNe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV, LHCb Collaboration, European Physical Journal C 83 (2023) 7, 625.

Search for medium effects using jets from bottom quarks in PbPb collisions at

$\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, CMS collaboration, Physics Letters B 844 (2023) 137849.

Open charm production and asymmetry in pNe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV, LHCb Collaboration, European Physical Journal C 83 (2023) 541.

J/ψ and D^0 production in $\sqrt{s_{NN}} = 68.5$ GeV PbNe collisions, LHCb Collaboration, European Physical Journal C 83 (2023) 658.

Observation of the B_c^+ Meson in Pb-Pb and pp Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV and Measurement of its Nuclear Modification Factor, CMS Collaboration, Physical Review Letters 128 (2022) 252301.

Fragmentation of jets containing a prompt meson in PbPb and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, CMS Collaboration, Physics Letters B 825 (2022) 136842.

Scaling properties of elastic proton-proton scattering at LHC energies, C. Baldenegro, C. Royon, A.M. Stasto, Physics Letters Volume 830 (2022) 137141.

Centrality determination in heavy-ion collisions with the LHCb detector, LHCb Collaboration, Journal of Instrumentation 17 (2022) 05, P05009.

Observation of nuclear modifications in W^\pm boson production in pPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, CMS Collaboration, Physics Letters B 800 (2020) 135048.

Nuclear broadening of Drell-Yan and quarkonium production from SPS to LHC, François Arléo et Charles-Joseph Naïm, Journal of High Energy Physics JHEP07 (2020) 220.

Quenching of Light Hadron Spectra in p-A collisions from Fully Coherent Energy Loss, François Arléo et Stéphane Peigné, Physical Review Letters 125 (2020) 032301.

First Measurement of Charm Production in its Fixed-Target Configuration at the LHC, LHCb Collaboration, Physical Review Letters 122 (2019) 13, 132002.

Measurement of prompt and nonprompt charmonium suppression in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, CMS Collaboration, European Physical Journal C 78 (2018) 509, Erratum: EPJ C 83 (2023) 145.

Comparing transverse momentum balance of b jet pairs in pp and PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, Journal of High Energy Physics 03 (2018) 181.

Physique des neutrinos

First joint oscillation analysis of Super-Kamiokande atmospheric and T2K accelerator neutrino data, Super-Kamiokande and T2K Collaborations (May 2024), Physical Review Letters 134 (2025) 1, 011801.

New methods and simulations for cosmogenic induced spallation removal in Super-Kamiokande-IV, Super-Kamiokande Collaboration, Physical Review D 110 (2024) no.3, 032003.

First measurement of muon neutrino charged-current interactions on hydrocarbon without pions in the final state using multiple detectors with correlated energy spectra at T2K, The T2K Collaboration, Physical Review D 108 (2023) 112009.

Measurements of the and -induced Coherent Charged Pion Production Cross Sections on ^{12}C by the T2K experiment, T2K Collaboration, Physical Review D 108 (2023) 9, 092009.

Search for Cosmic-Ray Boosted Sub-GeV Dark Matter Using Recoil Protons at Super-Kamiokande, Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 130 (2023) no.3, 031802 [erratum: Physical Review Letters 131 (2023) no.15, 159903].

Comparisons and challenges of modern neutrino-scattering experiments, M. Buizza Avanzini et al., Physical Review D 105 (2022) 9, 092004.

Sensitivity of the upgraded T2K Near Detector to constrain neutrino and antineutrino interactions with no mesons in the final state by exploiting nucleon-lepton correlations, S. Dolan et al., *Physical Review D* 105 (2022) 3, 032010.

Measurements of $\bar{\nu}_\mu$ and $\bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$ charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV, *Progress of theoretical and experimental physics*, 2021 (2021) 4, 043C01.

Diffuse supernova neutrino background search at Super-Kamiokande, *Super-kamiokande Collaboration*, *Physical Review D* 104 (2021) no.12, 122002.

Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations, T2K Collaboration, *Nature* 580 (2020) no.7803, 339-344 [erratum: *Nature* 583 (2020) no.7814, E16].

Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K, T2K Collaboration, *Physical Review D* 101, (2020) 112004.

First measurement of the charged current $\bar{\nu}_\mu$ double differential cross section on a water target without pions in the final state, T2K Collaboration, *Physical Review D* 102 (2020) 1, 012007.

First combined measurement of the muon neutrino and antineutrino charged-current cross section without pions in the final state at T2K, T2K Collaboration, *Physical Review D* 101 (2020) 112001.

Astroparticules

High-Statistics Measurement of the Cosmic-Ray Electron Spectrum with H.E.S.S., H.E.S.S. Collaboration, *Physical Review Letters* 133 (2024) 221001.

Acceleration and transport of relativistic electrons in the parsec-scale jets of the microquasar SS 433, H.E.S.S. Collaboration, *Science*, 383 (2024) 6681.

Discovery of a Radiation Component from the Vela Pulsar Reaching 20 Teraelectronvolts, H.E.S.S. Collaboration, *Nature Astronomy*, 7 (2023) 1341-1350.

Time-resolved hadronic particle acceleration in the recurrent nova RS Ophiuchi, H.E.S.S. Collaboration, *Science* Vol 376, Issue 6588 (2022) pp. 77-80.

A gamma-ray pulsar timing array constrains the nanohertz gravitational wave background, Fermi-LAT Collaboration, *Science* 376 (2022) pp. 521-523.

Resolving acceleration to very high energies along the jet of Centaurus A, H.E.S.S. Collaboration, H. Abdalla et al, *Nature* 82 (2020) 356–359.

A decade of multi-wavelength observations of the TeV blazar 1ES 1215+303: Extreme shift of the synchrotron peak frequency and long-term optical-gamma-ray flux increase, J. Valverde et al., Fermi-LAT Collaboration, *Astrophysical Journal* 891 (2020) 170.

Resolving the Crab pulsar wind nebula at teraelectronvolt energies, H.E.S.S. Collaboration, *Nature Astronomy* 476 (2019) 2, 167-173.

A very-high-energy component deep in the g-ray burst afterglow, H.E.S.S. Collaboration, H. Abdalla et al., *Nature* 575 (2019) 7783, 464–467.

A gamma-ray determination of the Universe's star formation history, Fermi-LAT Collaboration, *Science* 362 (2018) pp. 1031-1034.

Multi-messenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A, IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S.

Évolution des publications sur la période 2018 – 2023

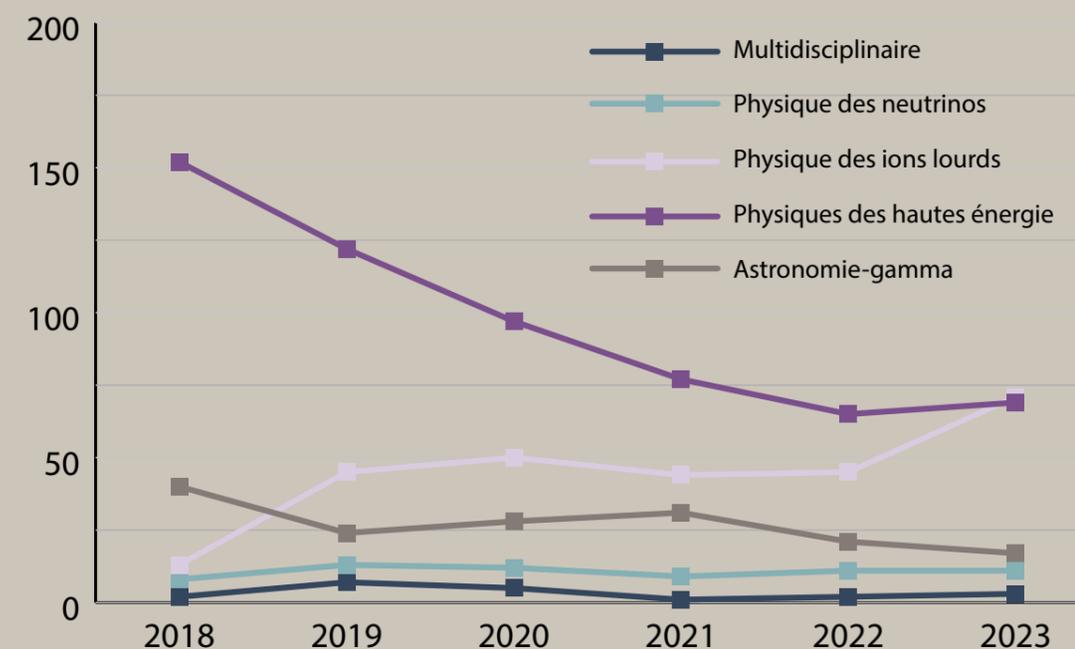


Figure 1 : Évolution des publications sur la période considérée.

Collaborations (2018), *Science*, 361, 6398.

Einstein@Home discovers a radio-quiet gamma-ray millisecond pulsar, C.J. Clark et al., Fermi-LAT Collaboration, *Science Advances* Vol. 4-2 (2018) 12pp.

L'évolution du nombre de contributions en tant qu'orateur, par domaine thématique et en fonction du temps de 2018 – 2023 est montrée à la **Figure 1**

L'évolution du nombre de publications par domaine thématique en fonction du temps de 2019 à 2024 est montrée à la **Figure 2**

Participations à des conférences par thématique sur la période 2018-2023 **Figure 3** et, participations à des conférences en fonction de la zone géographique **Figure 4**

7.6 Implications dans le tissu local et économique

Les grands projets internationaux et les liens avec les plus grands laboratoires et universités de la planète contribuent certainement au prestige de l'université hébergeant l'UMR – en l'occurrence l'École polytechnique pour le LLR sur le campus de l'Institut Polytechnique de Paris, mais le pilotage stratégique, souvent à long terme, de ces projets de recherche en physique fondamentale se situe clairement au niveau national. L'intégration dans le tissu scientifique local passe plutôt par le soutien à des projets de physique applicative ou multidisciplinaire avec des sources de financement sur projets, ou par la valorisation d'innovations technologiques.

Au cours des 5 dernières années, le LLR a soutenu des projets d'avant-garde avec un impact fort dans trois domaines :

- PEPITES – Profileur de faisceau pour les applications biomédicales, dont l'hadron-thérapie.
- GALOP – Étude expérimentale et numérique (code de simulation SMILEI) de l'accélé-

La répartition des publications du LLR par domaine thématique intégrée sur la période 2019-2024

| | | Nb publications | |
|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------|
| | | Équipes | 2018 - 2023 |
| Astronomie gamma | Astro-CTA | | 30 |
| | Astro-FERMI | | 75 |
| | Astro-HESS | | 56 |
| Astronomie gamma | Total | | 161 |
| Physique des hautes énergies | CMS HEP | | 552 |
| | CMS ions lourds | | 62 |
| | R&D SiW-Ecal | | 19 |
| | Babar | | 8 |
| | CMS - divers | | 5 |
| Physique des hautes énergies | Total | | 646 |
| Physique des ions lourds | LHCb ions lourds | | 242 |
| | PHENIX | | 13 |
| | Théorie | | 7 |
| Physique des ions lourds | Total | | 262 |
| Physique des neutrinos | Neutrinos - T2K | | 30 |
| | Neutrinos - SK - HK | | 24 |
| | Neutrinos - Autres | | 10 |
| Physique des neutrinos | Total | | 64 |
| Multidisciplinaire | Application laser Plasma | | 10 |
| | Application biomédicale, Geant 4 | | 10 |
| Multidisciplinaire | Total | | 20 |
| | | Total général | 1153 |

Figure 2 : Répartition des publications

Participations à des conférences par thématique

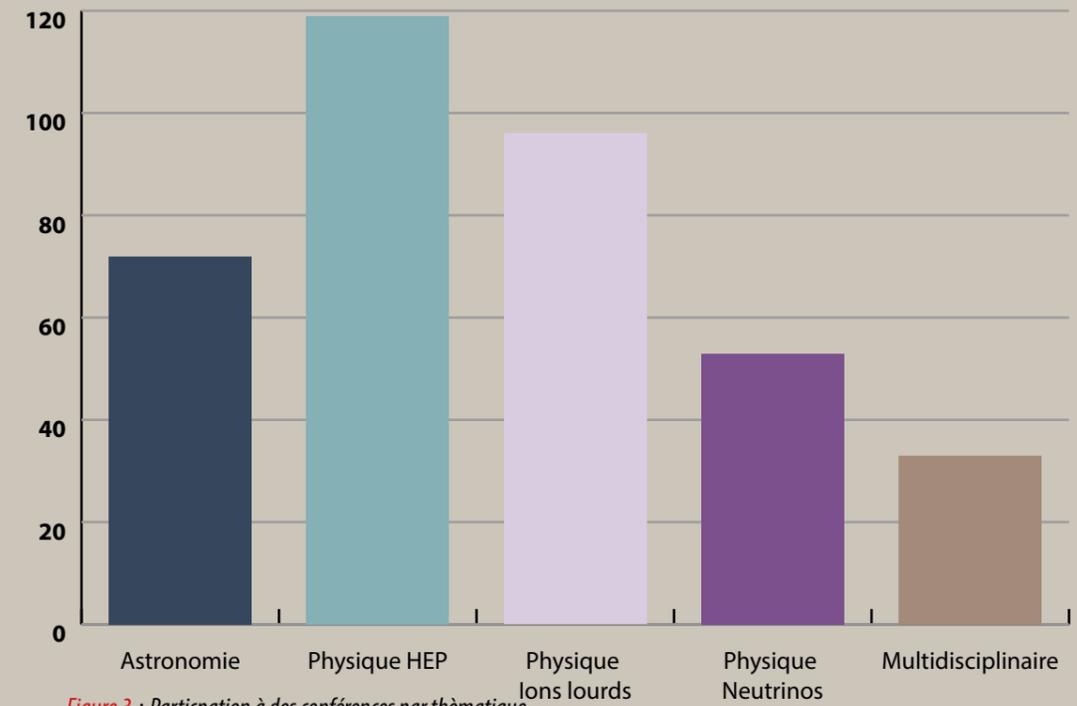


Figure 3 : Participations à des conférences par thématique.

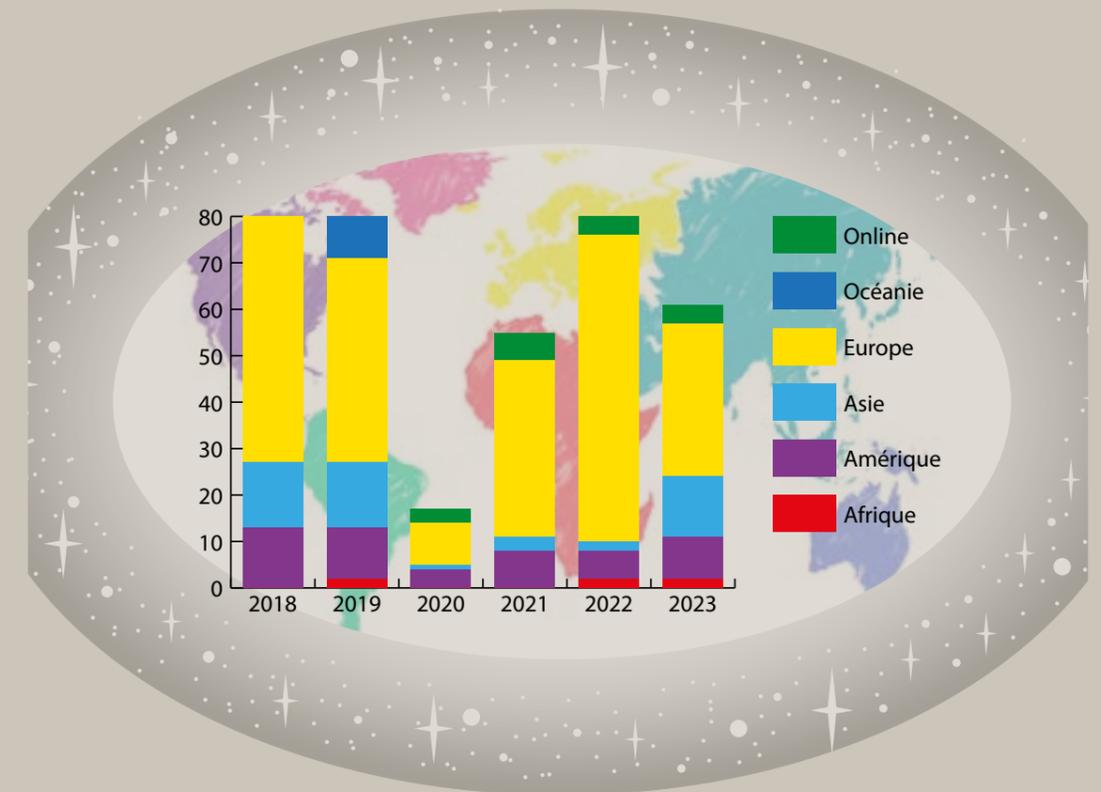


Figure 4 : Participations à des conférences en fonction de la zone géographique

ration laser-plasma d'électrons et de ses applications (dans le périmètre de l'IN2P3).

- Science & Jeu Vidéo – Chaire soutenue par UbiSoft. Création d'un GameLab au LLR ; enseignement et projets de scientifiques collectifs (PSCs) pour le cycle ingénieur à l'École polytechnique ; création du jeu Exographer inspiré de la physique des particules.

7.7 Impact académique

Il s'agit des contributions à l'enseignement spécialisé de la physique. Une spécificité locale pour les scientifiques du LLR est que la très grande majorité des cours sur le campus sont effectués par des chercheurs CNRS en cumul de postes.

Les scientifiques du LLR sont fortement impliqués dans la vie académique sur le campus de l'Institut Polytechnique de Paris (IPP), avec plus d'une dizaine de personnes impliquées dans l'enseignement autant pour le cycle ingénieur de l'École polytechnique que pour le bachelor de l'Institut Polytechnique de Paris ou le Master Physique des Hautes Énergies commun à l'École polytechnique et à ETH Zurich.

Quelques responsabilités académiques (hors cours ou laboratoires) :

- Pascal PAGANIN et Thomas MUELLER, Co-responsables du Master Physique des Hautes Énergies (École polytechnique et ETH Zurich).
- Frédéric FLEURET, Directeur adjoint de l'ED PHENIICS (2015 – 2018).
- François ARLÉO, Directeur adjoint de l'ED PHENIICS (2018 – 2020).
- Matthew NGUYEN, Membre du Bureau Exécutif de l'École Doctorale IP Paris.
- Yves SIROIS, Responsable du pôle thématique Structures et Lois Universelles au Département de physique de l'École polytechnique (≥ 2018) ; membre avec voix délibérative du Jury du Concours d'Admission à l'École polytechnique (≥ 2020).
- Philippe BUSSON Coordinateur du LabEx P2IO (2015 – 2018) ; membre du Comité de Direction du LabEx P2IO – S1 Symétries dans le monde subatomique (2015 – 2022).

7.8 Médiation scientifique

La médiation scientifique auprès des élèves et du grand public fait partie intégrante des responsabilités de la science fondamentale. Les grands sujets existentiels sur l'origine et la nature de la matière et des interactions quantiques, ou encore les observations d'astronomie des hautes énergies liées au questionnement cosmologique par exemple, sont autant de sujets jouant un rôle déterminant pour l'attractivité, le soutien et l'irrigation de la science en général, qu'elle soit applicative ou fondamentale. Les scientifiques du LLR ont développé une activité forte de médiation scientifique sous l'impulsion, entre autres, de É. Maurice et Ch. Thiebaux.

Ces activités de médiation sont adaptées à la diversité du public :

- Le grand public, novice et familial, découvre le laboratoire via notre participation annuelle à la fête de la science – organisée à l'automne à l'École polytechnique, incluant des visites de laboratoires, une conférence mais aussi un stand adapté à tous les niveaux scientifiques (jeux, salle de contrôle, réalité virtuelle, chambre à brouillard)
- Les collégiens ou lycéens sont invités à découvrir la physique des particules à travers différentes actions. Tout d'abord, une journée de la fête de la science annuelle leur est dédiée : nous proposons aux 6 classes de la journée des activités adaptées à chaque niveau. Le laboratoire organise aussi, chaque année, deux International MasterClass avec le CERN : après une matinée de conférences, les lycéens sont invi-

tés à analyser des données réelles de l'expérience CMS puis à partager leur découverte avec des lycéens d'autres pays. Il s'agit d'une première expérience concrète de la recherche internationale. Le laboratoire prend aussi part à des actions du pôle égalité des chances de l'X. En effet, une à deux fois par an, nous proposons des visites de notre laboratoire à des lycéens suivis par le pôle égalité des chances.

- Les étudiants du campus de l'IPP sont aussi un public privilégié de notre laboratoire. Chaque année, à leur arrivée sur le campus, nous effectuons de multiples visites de laboratoires (2 pour les bachelors, 3 pour les ingénieurs et 1 pour les masters).
- A ces événements réguliers, s'ajoutent diverses actions liées à des anniversaires ciblés, tels les "70 ans du CERN" et les "150 ans de la SFP" à la Cité des sciences et de l'Industrie (CEA, CNRS/IN2P3, SFP, CERN). On notera aussi que les supports de médiation produits au LLR (de type jeu) sont dorénavant empruntés par des collègues pour des actions de médiations dédiées (CEA, SOLEIL).

Glossaire des acronymes

A

| | |
|---------|--|
| ADC | Analog to Digital Converter ou convertisseur analogique numérique |
| AGN | Active Galactic Nucleus |
| AI | Artificial Intelligence ou IA Intelligence Artificielle |
| ALEPH | Apparatus for LEP PHysics at CERN |
| ALICE | A Large Ion Collider Experiment |
| ALP | Accélération par Laser-Plasma |
| ANF | Actions Nationales de Formation |
| ANR | Agence Nationale de la Recherche |
| API | Application Programming Interface |
| ARRONAX | Accélérateur pour la Recherche en Radiochimie et Oncologie à Nantes-Atlantique |
| ASIC | Application-Specific Integrated Circuit |
| ATCA | Advanced Telecommunications Computing Architecture |
| ATels | Astronomy Telegrams |
| ATLAS | A toroidal Lhc Apparatus |

B

| | |
|-------|--|
| BaBar | d'après la notation du meson B et de son antiparticule B barre |
| BDT | Boosted Decision Trees |
| BEH | Brout-Englert-Higgs |
| BRIL | Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity |

C

| | |
|--------|---|
| CAC | Centre d'Assemblage du Cern |
| CALICE | CALorimeter for the LInear Collider Experiment |
| CAN | Convertisseur Analogique Numérique |
| CAT | Čerenkov Array at Themis |
| CCSN | Core-Collapse Supernova |
| CDD | Contrat à Durée Déterminée |
| CEA | Commissariat à l'Energie Atomique |
| CE-E | Calorimeter Endcap – Electromagnetic |
| CE-H | Calorimeter Endcap – Hadronic |
| CEPC | Circular Electron Positron Collider |
| CERN | Laboratoire européen pour la physique des particules |
| CKM | Cabbibo-Kobayashi-Maskawa |
| CLIC | Compact LInear Collider |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CMS | Compact Muon Solenoïd |
| CNAM | Conservatoire National des Arts et Métiers |
| CNAO | Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica |
| CNN | Convolutional Neural Network ou réseau de neurones convolutif |
| CNRS | Centre National de la Recherche Scientifique |
| CP | Charge - Parité |
| CPO | Centre de Protonthérapie d'Orsay |
| CPU | Central Processing Unit ou unité centrale de calcul |
| CSNSM | Centre de Sciences Nucléaires et Sciences de la Matière |
| CTA | Cherenkov Telescope Array |
| CTN | Convertisseur Temps Numérique |

D

| | |
|-------|--|
| DAQ | Data AcQuisition ou acquisition de données |
| DDR | Double Data Rate ou double débit de données |
| DEPIP | Département d'Electronique des Détecteurs et d'Informatique pour la Physique |
| DESY | Deutsches Elektronen-Synchrotron |
| DNN | Deep Neural Network ou reseau de neurones profond |
| DPP | Département de Physique des Particules |
| DQM | Data Quality Monitoring |
| DR | Design report |
| DSNB | Diffuse Supernova Neutrino Background ou Fond diffus de neutrinos de supernovæ |

E

| | |
|----------|--|
| ECAL | Electromagnetic CALorimeter ou calorimètre électromagnétique |
| ECRC | Early Career Researchers Committee |
| e.g. | Du latin exempli gratia ou par exemple |
| EGI | European Grid Infrastructure |
| EIC | Electron-Ion Collider |
| EOI | Expression Of Interest ou expression d'intérêt |
| EPFL | Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne |
| ePIC | Electron – Proton / Ion Collider |
| ERC | European Research Council ou conseil européen de la recherche |
| EuPRAXIA | European Plasma Research Accelerator with eXcellence In Applications |

F

| | |
|------|--|
| FEB | Front-End Board ou carte front-end |
| FCC | Future Circular Collider ou futur collisionneur circulaire |
| FGD | Fine Grained Detectors |
| FPGA | Field Programmable Gate Array |
| FRB | Fast Radio Burst |
| FSRQ | Flat Spectrum Radio Quasar |

G

| | |
|---------|--|
| GALOP | Groupe d'Accélération par Laser et Onde Plasma |
| GBM | Gamma-ray Burst Monitor |
| GDR | Groupement De Recherche |
| GEANT 4 | GEometry And Tracking 4 |
| GLAST | Gamma-ray Large Area Space Telescope |
| GNN | Graph Neural Network ou réseau de neurones graphique |
| GPU | Graphics Processing Unit ou processeur graphique |
| GRB | Gamma-Ray Burst |

H

| | |
|----------|---|
| HARPO | Hermetic Argon POLarimeter |
| HA-TPC | High-Angle TPC |
| HCERES | Haut Conseil de l'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur |
| HD | High Density ou haute densité |
| HDR | Habilitation à Diriger des Recherches |
| HEP | High Energy Physics ou physique des hautes énergies |
| HERA | Hadron-Electron Ring Accelerator |
| H.E.S.S. | High Energy Stereoscopic System |
| HGCAL | High Granularity CALorimeter |
| HGCROC | HGCAL Read-Out Chips |
| HK | Hyper-Kamiokande |
| HL-LHC | High Luminosity - Large Hadron Collider |
| HLS | High Level Synthesis ou synthèse de haut niveau |
| HLT | High Level Trigger ou trigger de haut niveau |

I

| | |
|--------|--|
| IACT | Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope |
| IBD | Inverse Beta Decay ou Désintégration bêta inverse |
| ICM | Intra Cluster Medium |
| IJCLab | Laboratoire de physique des 2 infinis Irène Joliot-Curie |
| ILANCE | International Laboratory for Astrophysics, Neutrinos and Cosmology Experiments |
| ILC | International Linear Collider |
| ILD | International Linear Detector |
| IN2P3 | Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules |
| INGRID | Interactive Neutrino GRID |
| IPP | Institut Polytechnique de Paris |
| IRF | Instrument Response Function |
| IRFU | Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers |
| IRL | International Research Laboratory |
| ITA | Ingénieurs, techniciens et personnels administratifs |

J

| | |
|---------|---|
| J-PARC | Japan-Proton Accelerator Research Complex |
| KESACCO | Keen Event Simulation and Analysis for CTA Cluster Observations |

K

KSP Key Science Project

L

Labex LABORatoire d'EXcellence
 LAT Large Area Telescope
 LD Low Density ou faible densité
 LED Light Emitting Diode ou diode électroluminescente
 LEP Large Electron Positron Collider ou Collisionneur électron-positron
 LHASSO Large High Altitude Air Shower Observatory
 LHC Large Hadron Collider ou Grand collisionneur de hadrons
 LHCb Large Hadron Collider beauty
 LIGO Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
 LLR Laboratoire Leprince-Ringuet
 LOA Laboratoire d'Optique Appliquée
 Lol Letter of Intent ou lettre d'intention
 LPICM Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces
 LPNHE Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies
 LS Long Shutdown
 LSI Laboratoire des Solides Irradiés
 LST Large Size Telescope
 L'X L'École Polytechnique

M

MAA Méthode Automatique d'Apprentissage
 MAGIC Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov
 MIB MPPC Interface Board
 MIP Minimum Ionizing Particles
 MITI Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires
 ML Machine Learning
 MoU Memorandum of Understanding
 MPPC Multi Pixel Photon Counter
 MST Medium Size Telescope
 MTD MIP Timing Detector

N

NASA National Aeronautics and Space Administration
 NectarCAM Nectar CAMera
 NLO Next to Leading Order
 NP Nouvelle Physique

O

OCB Optical Concentrator Board
 OMEGA Organisation de MicroElectronique Générale Avancée

P

P2IO Physique des 2 Infinis et des Origines
 PALLAS Prototype AccéLérateur Laser Plasma
 PC Personal Computer ou ordinateur personnel
 PCA Principal Component Analysis
 PCB Printed Circuit Board ou circuit imprimé
 p.e. Photo Electron
 PEPITES Profileur pour ions thérapeutiques à électrons secondaires
 PF Particle Flow
 PFU Plan de Formation de l'Unité
 PhD Philosophiae Doctor
 PIC Particle-In-Cell
 PLUME Probe for LUminosity MEasurement
 PMT Photo-Multiplier Tube ou tube photomultiplicateur
 PSC Projet Scientifique Collectif
 PU Pile-Up ou empilement
 PUFF PEPITES for Ultra Flash Facilities

Q

QCD Quantum Chromodynamics ou Chromodynamique quantique
 QED Quantum ElectroDynamics
 QGP Quark Gluon Plasma ou Plasma de quarks-gluons
 QR CODE Quick Response Code

R

RNN Recurrent Neural Network ou réseau de neurone récurrent

S

SATT Société d'Accélération du Transfert de Technologies
 SEE Secondary Electron Emission
 SIMD Single Instruction / Multiple Data
 SiPM Silicon Photo-Multiplier
 SK Super-Kamiokande
 SLAC Stanford Linear Accelerator Center
 SM Standard Model ou modèle standard
 SMILEI Simulating Matter Irradiated by Light at Extreme Intensities
 SMOG System for Measuring Overlap with Gas
 SPLASH Single Pepites profiler for fLASH therapies
 SPLIF Simple moniteur pour intensités flash
 STXS Simplified Template Cross-Section
 Super-FGD/sFGD Super Fine-Grained Detector

T

T2K Tokai to Kamioka
 TDC Time to Digital Converter ou convertisseur temps numérique
 TDR Technical Design Report
 TESLA Accélérateur Linéaire Supraconducteur d'un TeV
 TICL The Iterative Clustering framework
 ToF Time of Flight ou temps de vol
 TP Trigger Primitive
 TPC Time Projection Chamber
 TPG Trigger Primitive Generator
 TRIDAS TRigger DAq System

U

UT Upstream Tracker
 UV Ultra-Violet

V

VBF Vector Boson Fusion ou Fusion de bosons vecteurs
 VBS Vector Boson Scattering ou Diffusion de bosons vecteurs
 VERITAS Very Energetic Radiation Imaging TelescopeArray System
 VHE Very High Energy ou très haute énergie
 VIRGO D'après l'amas de la vierge, *virgo* en latin

W

WAGASCI Water Grid And SCIntillator
 WET Water Equivalent Thickness

Contributions :

Tout le personnel du LLR

Équipe éditoriale :

Florian Beaudette
Denis Bernard
Arnaud Beck
Vincent Boudry
Philippe Bruel
Antoine Cauchois
Frédéric Fleuret
Franck Gastaldi
Raphaël Granier de Cassagnac
Michel Hoarau
Mathieu Jacobé de Naurois
Frédéric Magniette
Émilie Maurice
Thomas Mueller
Matthew Nguyen
Pascal Paganini
Benjamin Quilain
Yves Sirois
Arnd Specka
Christophe Thiebault
Marc Verderi
Éric Wanlin

Conception graphique :

Sylvaine Pieyre
Christophe Thiebaut

Crédits :

LLR UMR 7638 - CNRS /IN2P3



**Laboratoire Leprince-Ringuet
UMR 7638
École polytechnique
91128 Palaiseau Cedex – France**

<https://llr.in2p3.fr/>