

LABORATOIRE DE PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET DE COSMOLOGIE

## RAPPORT D'ACTIVITÉ

2 0 2 2 - 2 0 2 4





# RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022 - 2024



## SOMMAIRE

<b>PARTICULES ET INTERACTIONS FONDAMENTALES.....</b>	<b>6</b>
Équipe ALICE .....	9
Équipe ATLAS .....	15
Équipe de physique théorique .....	22
Équipe neutrons ultrafroids (UCN) .....	29
<b>ASTROPARTICULES, COSMOLOGIE &amp; PHYSIQUE DES NEUTRINOS.....</b>	<b>36</b>
Équipe Auger .....	39
Équipe Cosmologie multi-longueurs d'onde .....	43
Équipe DARK.....	50
Équipe Matière Noire (MIMAC) .....	58
Équipe Neutrino .....	61
<b>PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LA SANTÉ.....</b>	<b>68</b>
Équipe Molten Salt Fast Reactor MSFR.....	71
Équipe Physique des réacteurs.....	76
Équipe Physique nucléaire et applications médicales.....	85
Neutrons pour la science et la société (projet transverse).....	96
<b>ACCÉLÉRATEURS, SOURCES D'IONS ET PLASMAS.....</b>	<b>96</b>
Pôle accélérateurs et sources d'ions .....	99
Pôle Plasmas, Matériaux, Nanostructures .....	108
<b>LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MODANE.....</b>	<b>114</b>
La plateforme nationale LSM .....	117
<b>PLATEFORMES ET INSTALLATIONS TECHNIQUES.....</b>	<b>122</b>
La plateforme neutronique GENESIS.....	125
Plateforme FEST .....	127
Plateforme des Procédés Plasma Avancés .....	129
Laboratoire de mesures de Basse Activité.....	131
Salle de Cosmologie Expérimentale .....	133
<b>ENSEIGNEMENT ET FORMATION PAR LA RECHERCHE.....</b>	<b>136</b>
Les formations Master et Ingénieur.....	139
<b>LE LABORATOIRE DANS LA SOCIÉTÉ.....</b>	<b>144</b>
Communication.....	147
Responsabilité Civile et Sociétale.....	152
<b>SOUTIEN AUX ACTIVITÉS DE RECHERCHE.....</b>	<b>156</b>
Service Administratif et Financier .....	159
Service Communication & Documentation.....	162
Service Détecteurs et Instrumentation.....	163
Service Électronique.....	169
Service Études et Réalisations Mécaniques .....	174
Service Informatique.....	181
Service Patrimoine et Infrastructures .....	186
Service Sécurité et Radioprotection.....	190

# PRÉAMBULE

**Le Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie est une unité de recherche ayant pour tutelles le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et l'Université Grenoble Alpes (UGA) et pour tutelle associée Grenoble INP Institut d'ingénierie et de management. Au sein du CNRS, le laboratoire est rattaché à l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3).**

**Les missions du laboratoire sont de participer au développement des connaissances par une recherche fondamentale dans le domaine de la physique subatomique et de la cosmologie, et par une recherche applicative en lien avec les enjeux sociétaux associés à nos disciplines. De plus le laboratoire contribue au partage des connaissances en participant à la formation des générations futures. Il assure la diffusion de ces connaissances à travers une communication adaptée aux différents publics et une valorisation de la recherche au bénéfice de la société.**

Le LPSC est un laboratoire couvrant aujourd'hui un vaste domaine de recherche. En effet, s'il a historiquement été construit autour de la physique nucléaire et de dispositifs accélérateurs installés sur le site, il s'est, à partir des années 1990, profondément renouvelé avec le développement d'équipes de recherche en physique des neutrinos, en physique des particules, dans les domaines des astroparticules et de la cosmologie, en physique des réacteurs nucléaires et en physique médicale. L'expertise acquise autour des accélérateurs du site a permis de mettre en place un pôle technologique engagé sur les développements d'autres accélérateurs et de sources d'ions. Les activités de l'équipe de physique théorique ont accompagné cette mutation. Le soutien de nos tutelles a permis à chacune de ces activités de prendre une place forte dans le paysage de la recherche dans nos domaines et donne aujourd'hui au LPSC une grande visibilité. En 2019, le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) est devenu une plateforme nationale intégrée au LPSC.

Le LPSC est structuré en neuf équipes de recherche et deux pôles de recherche technologique répartis en quatre axes : « Particules et interactions élémentaires », « Astroparticules, Cosmologie, Neutrinos », « Accélérateurs et Sources d'ions, Plasmas », « Energie et Santé », et en neuf services dont cinq services techniques : « Détecteurs et Instrumentation », « Informatique », « Électronique », « Études et Réalisations Mécaniques », « Ultra Basse Activité » (basé à Modane), et quatre services d'appui à la recherche : « Administration et Finances », « Patrimoine & Infrastructures », « Sécurité & Radioprotection » et « Communication & Documentation ».

Ce rapport présente les évolutions majeures des activités et les principales réalisations du laboratoire pour la période allant de début 2022 jusqu'à fin 2024.

Ces années ont été marquées par une stabilisation de notre environnement de recherche sur le site de Grenoble avec la fin de la phase d'expérimentation et la création du Grand Établissement université Grenoble Alpes (UGA) au 1<sup>er</sup> janvier 2024. L'UGA et Grenoble INP (établissement-composante de l'UGA) ont connu un renouvellement de leurs conseils et équipes présidentielles. La prolongation des Labex de l'UGA a été confirmée, avec notamment les labex ENIGMASS+ (et la fédération de recherche associée regroupant les laboratoires IPAG, LAPP, LAPTh et LPSC), FOCUS (développement de détecteurs pour l'exploration de l'univers) et GIMED (un nouveau Labex dédié aux dispositifs médicaux). Par ailleurs, l'ouverture du programme de MIAI (Institut International d'Intelligence Artificielle de Grenoble) offre une opportunité d'intégrer nos disciplines dans ce domaine en pleine expansion.

Concernant notre institut de rattachement, l'IN2P3, une nouvelle direction est en place depuis le début de l'année 2025, avec des orientations stratégiques qui, bien que dans la continuité, traduisent une volonté de décloisonner

l'institut tout en préservant son identité scientifique, et le maintien d'un fort lien avec les laboratoires et d'. Cette proximité entre la direction de l'institut et les laboratoires se concrétise par des échanges réguliers à travers les visites des délégués scientifiques et techniques, par les réunions mensuelles des directeurs d'unités de l'IN2P3, et la tenue annuelle de l'entretien objectifs-moyens (EAOM) rassemblant l'ensemble des tutelles du laboratoire. Cette forte cohésion de la communauté des laboratoires de l'institut est un atout majeur.

Durant ces années, la vie collective au laboratoire a continué à s'enrichir, rythmée par des temps forts qui ont favorisé les échanges entre les membres du laboratoire. Parmi ces moments fédérateurs, l'Assemblée Générale et le repas de fin d'année, ainsi que la Journée du laboratoire en été, ont constitué des occasions privilégiées de partage et de réflexion collective. Les Cafés du jeudi, organisés une fois par mois, rassemblant une grande partie du personnel du laboratoire ont également contribué à maintenir un lien régulier et informel. Sur un plan plus institutionnel, la vie du laboratoire s'articule autour de conseils de laboratoire (dix réunions par an) et d'assemblées générales (EAOM, etc.), permettant d'aborder et de discuter des sujets impactant pour le laboratoire en impliquant l'ensemble des personnels dans la vie de l'unité. L'activité scientifique collective est animée autour de Conseils Scientifiques (2 par an), qui permettent de passer en revue nos activités et d'en faire la prospective. En complément, des séminaires et colloques ont été proposés à un rythme mensuel, ainsi que des rencontres plus informelles comme le Café Cosmo (chaque semaine) et le Café Machine Learning (deux fois par mois). Les soutenances de thèse, et d'HDR, au nombre de 10 à 15 par an, sont également des moments marquants pour la communauté du laboratoire.

En parallèle de ces activités scientifiques et institutionnelles, des actions et projets collectifs ont été engagés pour améliorer le cadre de vie au travail, en cohérence avec nos engagements en matière de responsabilité sociale et environnementale. Des initiatives issues de groupe de travail thématiques (jardinage, musique...) ont renforcé la dimension collaborative de la vie au laboratoire. Des efforts significatifs ont également été consacrés à l'amélioration des infrastructures : réhabilitation du bâtiment 9, modernisation des bureaux avec de nouvelles peintures et des éclairages LED, installation de robinets thermostatiques sur les radiateurs et réaménagement de l'entrée du laboratoire. Conscient de l'impact de notre activité sur l'environnement, le laboratoire s'engage activement dans une démarche de développement durable. Une cellule dédiée à la biodiversité a été mise en place, avec des actions concrètes telles que la plantation de haies vives, la construction de haies sèches et l'installation d'un éclairage extérieur plus respectueux de la faune nocturne. Ces efforts s'inscrivent dans une démarche de labellisation LPO pour la préservation de la biodiversité locale. Parallèlement, une cellule développement durable œuvre à la mesure de notre empreinte carbone et à l'élaboration de trajectoires de réduction, afin d'adopter des pratiques plus durables et responsables dans nos activités scientifiques et techniques. Une équipe de chargé-e-s de mission Égalité-Parité a été mise en place afin de promouvoir une plus grande diversité et inclusion au sein de l'unité. La création d'un Comité Technique Administratif permet désormais d'accompagner plus efficacement les enjeux liés au fonctionnement quotidien du laboratoire et à l'optimisation des services supports en créant un espace d'échange et de travail constructif entre le service administratif et les agents.

Ces évolutions, accompagnés du renouvellement régulier des responsabilités d'équipe et de service, témoignent de l'adaptabilité du laboratoire face aux évolutions scientifiques et institutionnelles.

Enfin, des réalisations structurantes ont vu le jour pour améliorer la communication au sein du laboratoire. Le lancement d'un nouvel intranet en novembre 2024 facilite désormais le partage d'informations et l'accès aux outils internes, tandis que le nouvel extranet, déployé en février 2025, contribue à renforcer l'image et la visibilité du laboratoire à l'extérieur.

Le règlement intérieur du laboratoire a été entièrement révisé afin d'intégrer de nouveaux dispositifs essentiels à l'organisation du travail et à la sécurité du site. Cette refonte, fruit d'un long processus d'échanges et de validation avec nos tutelles, permet notamment d'officialiser et de structurer la mise en place du télétravail, offrant ainsi un cadre clair et adapté aux besoins des personnels. D'autres aspects ont également été précisés, tels que le cumul d'activités, les astreintes et sujétions, afin d'assurer une meilleure gestion des obligations professionnelles. Ce nouveau règlement intérieur intègre aussi les nouvelles procédures liées au passage du site de Grenoble en Zone à Régime Restrictif (ZRR), renforçant ainsi les mesures de contrôle et de protection des activités sensibles du laboratoire.

Le laboratoire a durant ces années poursuivi son engagement en faveur de la diffusion des savoirs et de la découverte du monde de la recherche auprès du grand public et des jeunes générations. À travers de nombreuses actions

de médiation scientifique, nous avons contribué à sensibiliser un large public à nos thématiques de recherche. L'ouverture vers les scolaires demeure une priorité, avec des initiatives variées visant à éveiller la curiosité scientifique des élèves, notamment à travers l'accueil de collégiens et lycéens en stage d'observation (38 en sur l'année scolaire 2023-2024 ; niveaux 3<sup>e</sup> et 2<sup>nd</sup>e), leur offrant une première immersion dans le monde de la recherche. Le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) a, quant à lui, poursuivi l'ouverture de son espace muséographique, attirant près de 1000 visiteurs cette année. Ces actions témoignent de notre volonté de partager nos connaissances et d'encourager les vocations scientifiques. Elles renforcent également notre ancrage territorial et notre rôle dans la transmission des savoirs, en mettant la recherche au service de la société.

L'organisation du laboratoire a connu plusieurs évolutions significatives durant ces années, visant à mieux structurer nos activités et à accompagner les dynamiques scientifiques et technologiques en cours. Les activités liées aux accélérateurs, aux sources d'ions et aux plasmas ont été restructurées en pôles de recherche technologique, offrant une meilleure visibilité et une plus grande cohérence à ces thématiques stratégiques. Du côté des équipes de recherche, une fusion des groupes COSMO-ML et DARK a été opérée pour donner naissance à une nouvelle équipe « Cosmologie Observationnelle », consolidant ainsi nos travaux dans ce domaine. Dans le même temps, certaines équipes ont cessé leurs activités : l'équipe Auger ainsi que l'équipe MIMAC ont pris fin ; les travaux sur la détection neutronique et la matière noire sont maintenus à travers une nouvelle plateforme.

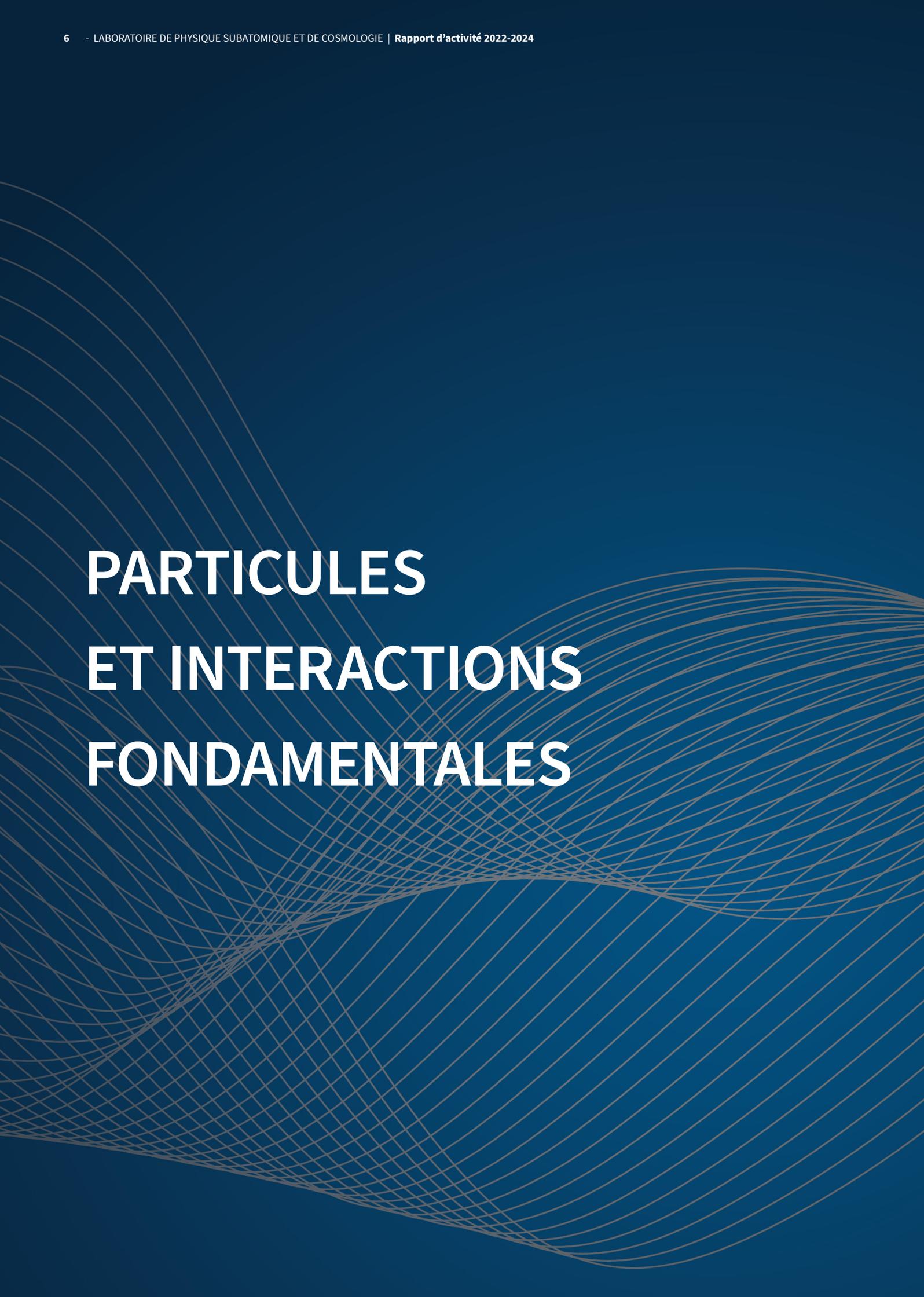
Concernant les activités scientifiques du laboratoire, cette période est marquée par la concrétisation de l'engagement du laboratoire à travers des contributions techniques importantes dans des expériences (Rubin, nEDM, Ricochet) qui vont entrer en phase d'exploitation scientifique. Cette période est aussi marquée par l'implication sur des projets majeurs à travers des contributions importantes qui entrent en phase de production qui vont continuer à mobiliser des ressources importantes dans les années qui viennent (DUNE, ATLAS). D'autres engagements, confirmés cette dernière année, témoignent de la capacité du laboratoire à s'engager sur des nouveaux projets stratégiques (ALICE ITS3, TESSERACT, PERLE). En parallèle, le laboratoire est fortement impliqué dans des expériences en cours de prise de données dans lesquels les équipes de recherche participent à l'exploitation des instruments et au retour scientifique (ALICE, ATLAS, AMS, AUGER, CONCERTO, NIKA2, STEREO). Dans le domaine des accélérateurs et des sources d'ions, le pôle a développé son activité de R&D, de construction et d'exploitation d'accélérateurs de particules et de sous-systèmes d'accélérateurs dans le cadre de collaborations notamment autour de grands projets d'accélérateurs comme SPIRAL2. En physique des réacteurs, les équipes ont poursuivi l'étude de dispositifs innovants (systèmes ou combustibles) pour la production d'énergie, la transmutation des déchets ou la propulsion spatiale. Concernant les applications pour la santé, les équipes développent des détecteurs innovants dédiés à la mesure de dose, au monitoring des faisceaux, à l'identification et à l'étude des zones touchées dans le cadre des projets de proton thérapie, et participent au développement de thérapies innovantes.

Le laboratoire met aussi en œuvre, notamment autour de ses plateformes, des projets de R&D qui permettent de développer des expertises techniques spécifiques et de préparer nos contributions futures. Cela est en particulier le cas pour le développement des détecteurs KIDS dédiés à la cosmologie dans le domaine millimétrique, la détection directionnelle de neutrons (MIMAC) autour d'une expertise développée pour la recherche, ou encore autour des détecteurs diamants pour le monitoring de la proton thérapie.

Le Laboratoire Souterrain de Modane a fusionné avec le LPSC en janvier 2019. C'est une plateforme de recherche unique en France dédiée à la recherche d'événements rares requérant un niveau de bruit de fond extrêmement bas, labellisée Infrastructure de Recherche (IR) depuis 2022. L'engagement du laboratoire dans les projets du LSM, notamment à travers TESSERACT et l'implication active de ses services, constitue un levier essentiel pour renforcer nos capacités et assurer l'exploitation de ce site dédié à la recherche souterraine. Cette dynamique collective ouvre également la voie à de nouvelles perspectives interdisciplinaires, permettant d'exploiter pleinement le potentiel unique du LSM.

Grâce à l'engagement de tous, le laboratoire continue d'évoluer, de s'adapter et d'innover. Les succès de ces dernières années témoignent de la vitalité de notre collectif et de notre capacité à mener à bien des projets ambitieux. Chaque projet, chaque avancée repose sur l'engagement collectif et la complémentarité des talents qui composent notre laboratoire. C'est cette cohésion qui nous permet nous projeter avec ambition vers de nouveaux défis pour les années à venir.

# PARTICULES ET INTERACTIONS FONDAMENTALES

The background of the page is a dark blue color. It features a complex, abstract pattern of thin, white, wavy lines that create a sense of depth and movement, resembling a grid or a series of overlapping waves. The lines are most dense in the lower half of the page and become sparser towards the top.

La matière de l'Univers est constituée de particules élémentaires qui interagissent par des forces fondamentales, au nombre de quatre dans l'état actuel de nos connaissances. La nature de ces constituants et la structure de trois de ces interactions sont décrites par une théorie appelée le modèle standard de la physique des particules. La découverte du boson de Higgs en 2012 a confirmé de façon éclatante la validité de cette théorie, et pourtant il est plus que jamais nécessaire de chercher à l'élargir. Ce modèle, en effet, d'une part n'inclut pas la quatrième interaction fondamentale, la gravitation, et d'autre part est incapable d'apporter des réponses à de nombreuses interrogations. Rechercher ce que l'on appelle alors 'la nouvelle physique' est l'un des axes de recherche principaux du LPSC. Deux approches complémentaires sont mises en œuvre. La première consiste à rechercher directement de nouvelles particules dans les données enregistrées par les expériences, notamment celles du détecteur ATLAS auprès du grand collisionneur de particules du CERN, le LHC. La seconde est une recherche indirecte qui consiste par exemple à mesurer avec la plus grande précision possible certaines observables clef. C'est le cas de l'expérience n2EDM, qui cherche à détecter un éventuel moment électrique dipolaire du neutron. Cela peut consister aussi à mesurer un état très particulier de la matière tel que le plasma de quarks et de gluons, également produit au LHC, pour l'étude duquel l'expérience ALICE est spécialisée. Les théoriciens quant à eux imaginent de nouvelles particules et de nouvelles interactions. Ils dialoguent avec les expérimentateurs, qui leur fournissent des observations à confronter à leurs modèles, et ils les aident à interpréter les données expérimentales.



# ÉQUIPE ALICE

L'équipe ALICE du LPSC se consacre à l'étude des états extrêmes de la matière nucléaire grâce aux collisions d'ions lourds produites par le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN. La ChromoDynamique Quantique (QCD), théorie des interactions fortes dans le modèle standard, prédit en effet, à haute température, une transition de phase de la matière nucléaire vers un système constitué de quarks et de gluons déconfinés quasi libres appelé Plasma de Quarks et de Gluons (PQG). Son étude permet de tester l'application de la QCD à un système déconfiné complexe de dimension finie dans des conditions de température semblables à celles qui prévalaient aux premiers instants de l'Univers, et ALICE est l'expérience du LHC qui est dédiée à cette étude.

## **Membres permanents**

Gustavo Conesa Balbastre, Julien Faivre, Christophe Furget, Rachid Guernane (responsable d'équipe).

## **Membres non permanents**

Carolina Arata (doctorante), Takuya Kumaoka (doctorant), Aimeric Landou (post-doctorant), Louise Millot (doctorante), Ran Xu (doctorante).

## **Personnels des services techniques**

Mohammed Chala, Jean-François Muraz, Patrick Stassi (Service Détecteurs et Instrumentation), Jean-Luc Bouly, Olivier Bourrion, Oumaïma Jaafoura, Nicolas Ponchant, Fatah Rarbi, Damien Tourres (Service Électronique).

## Enjeux scientifiques

Dans la période 2022–2024, marquée par le début du Run 3 de prise de données du LHC, le groupe ALICE du LPSC s'est attaché à finaliser les publications des résultats d'analyses des données du Run 2, démarrer l'exploitation des nouvelles données collectées et initier un travail de R&D sur les prochaines générations de détecteurs dans la perspective des jouvences de l'expérience ALICE prévues pour le Run 4.

Le groupe ALICE du LPSC a mesuré le spectre en impulsion transverse ( $p_T$ ) de photons isolés

en collisions pp à une énergie dans le centre de masse de  $\sqrt{s} = 13$  TeV avec les données du Run 2. Le spectre obtenu s'étend de 7 à 200 GeV/c permettant d'accéder à des valeurs de  $p_T$  beaucoup plus basses que celles des résultats obtenus par les expériences ATLAS et CMS du LHC ( $p_T > 125$ –190 GeV/c). Les résultats obtenus sont en accord avec les calculs de QCD perturbative au premier ordre sous-dominant (NLO) (voir figure 1). La mesure du  $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$  du photon atteint presque  $10^{-3}$ , ce qui en fait la plus basse valeur publiée à ce jour pour des mesures à mi-rapacité. Cette mesure permettra de contraindre la fonction de distribution (PDF) du gluon dans le proton.

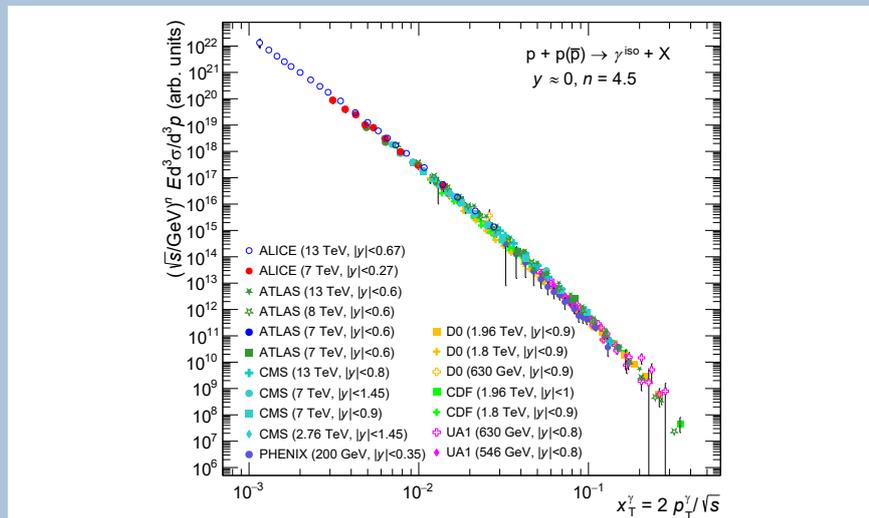


Figure 1 (extrait de [7]).

Compilation des mesures de la section efficace de production de photons isolés aux rapidités centrales en fonction de  $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$  en collisions pp. La mesure réalisée à l'énergie de  $\sqrt{s} = 13$  TeV par le groupe ALICE du LPSC étend ces mesures vers les plus bas  $x_T$ .

Le spectre de photons isolés a également été mesuré en collisions pp et Pb–Pb à une énergie par paire de nucléons dans le centre de masse de  $\sqrt{s}_{NN} = 5.02$  TeV avec les données du Run 2. Les résultats, qui montrent comme attendu que les photons isolés n'interagissent pas avec le PQG, sont compatibles avec des effets dans l'état initial dus aux différences entre les PDF nucléaires et celles du proton (voir figure 2). Cette mesure, inédite en collisions Pb–Pb, atteint les plus basses valeurs d'impulsion transverse obtenues à ce jour au LHC (10–14 GeV/c selon la centralité). Les résultats obtenus montrent un bon accord avec les calculs de QCD perturbative à l'ordre NLO. De plus, la comparaison des spectres mesurés avec deux configurations d'isolation de ces photons

permet de contraindre la production des photons de fragmentation prédite par la théorie.

Cette mesure confirme également la nécessité de corriger le paramètre  $N_{coll}$  (nombre de collisions binaires nucléon–nucléon) en collisions périphériques. Ce paramètre est calculé en utilisant la mesure de la multiplicité de particules produites dans la collision, mais à partir d'un modèle qui ne tient pas compte de la géométrie initiale de la collision ni de la présence de jets, effets qui biaisent le calcul de la multiplicité de particules. Nos mesures sont en accord avec des modèles qui, eux, incluent ces effets.

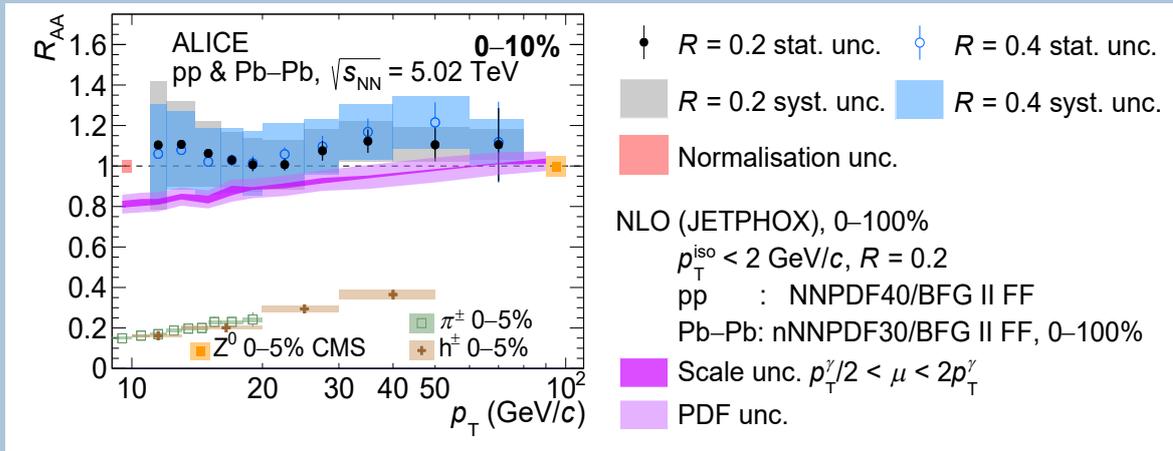


Figure 2 (extrait de [9]).

Facteur de modification nucléaire  $R_{AA}$  défini comme le rapport du spectre de production de particules mesuré en collisions Pb–Pb, sur celui mesuré en collisions p–p à l'énergie de  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. Ce rapport est normalisé par le nombre de collisions nucléon–nucléon pour obtenir un rapport par collision de nucléon. Le  $R_{AA}$  des photons isolés selon deux configurations différentes (cercles bleus et noirs) est comparé à celui des hadrons (losanges marrons) et pions chargés (carrés verts) mesurés par ALICE, des bosons  $Z^0$  mesurés par CMS (carrés oranges), et à des calculs QCD à l'ordre NLO obtenus avec JETPHOX (bandes violettes).

Enfin, la détection des photons isolés en collisions Pb–Pb a également permis de clôturer l'analyse de leurs corrélations avec les hadrons de recul, déjà publiée pour des collisions pp et pPb. Cette analyse est complexe mais cependant cruciale pour mieux comprendre comment un quark de haute énergie interagit dans le QGP. Comme attendu, on observe une forte

suppression des hadrons de recul pour des  $p_T$  de photon compris entre 18 et 40 GeV/c (voir figure 3). Cette suppression est d'autant plus marquée que le paramètre d'impact entre les noyaux de Plomb entrant en collision est faible. Les résultats obtenus, dominés par les incertitudes statistiques, sont en accord avec des modèles théoriques de QCD perturbative qui incluent la présence du PQG dans la collision.

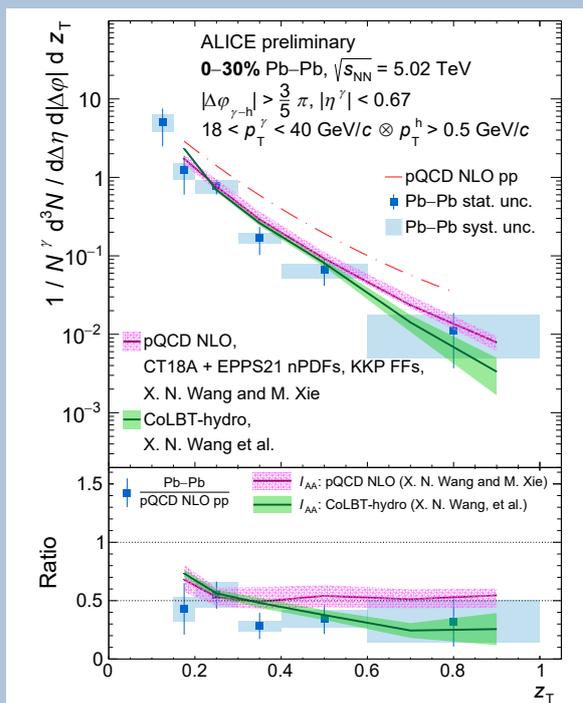


Figure 3 (Crédit : thèse de Carolina Arata, LPSC, CNRS).

En bleu, distribution des particules chargées émises en direction opposée à un photon isolé en fonction de  $z_T = p_T$  (hadron) /  $p_T$  (photon), mesurée par la Collaboration ALICE en collisions Pb–Pb à faible paramètre d'impact à  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. Des prédictions théoriques sont ajoutées : modèle CoLBT (bande verte), QCD perturbative pour des collisions pp (ligne rouge) et pour des collisions Pb–Pb avec perte d'énergie (bande violette). Les rapports à la prédiction QCD pour collisions pp sont montrés en bas..

## Perspectives des analyses pour le Run 3

Le Run 3, débuté en 2022 après une période de mise à niveau technique (LS2, 2019–2021), est une étape cruciale pour l'expérience ALICE. Grâce aux améliorations des détecteurs et de l'acquisition de données, l'objectif est d'obtenir un échantillon statistique dix fois plus grand que lors des Runs 1 et 2, ouvrant la voie

à des mesures plus précises des propriétés (thermo) dynamiques du PQG. Dans ce contexte, le groupe ALICE du LPSC poursuit son travail de caractérisation du PQG à l'aide de sondes dures en intensifiant ses efforts sur l'utilisation des jets et des quarks lourds (charmés et beaux) qui sont au cœur du programme scientifique de l'expérience ALICE pour les Runs 3 et 4. L'analyse de la perte d'énergie des quarks lourds permettra de tester leur propagation dans le PQG, en utilisant des techniques d'apprentissage automatique pour améliorer les algorithmes de reconstruction.

## Réalisations techniques : de FoCal à ITS3

L'une des avancées majeures pour le Run 3 a été l'introduction d'un mode de lecture en continu pour les détecteurs de l'expérience ALICE. Ce changement, impliquant un nouveau format de données et des infrastructures logicielles entièrement repensées, est une étape déterminante pour gérer les grands flux de données générés par les collisions à plus haut taux d'interaction.

Le service électronique du LPSC a joué un rôle clé dans cette transformation grâce à sa contribution au projet CRU (Common Readout Unit). Ce projet, initié dès 2017, s'est intensifié jusqu'en 2022 avec :

- L'allègement et l'optimisation du firmware des CRU : cette optimisation a permis une réduction de 43 % à 29 % de l'utilisation des ressources FPGA, garantissant une meilleure stabilité et l'ajout de fonctionnalités nouvelles.
- Ajout de modes spécifiques pour le test et le débogage : en particulier, des outils de contrôle du flux et des options de mise à jour à distance ont été implémentés, facilitant la gestion de centaines de cartes CRU.

Ces efforts ont permis d'assurer une lecture fluide et fiable des détecteurs ITS et TPC, les plus exigeants en termes de débit.

Entre 2022 et le premier semestre 2023, le groupe ALICE du LPSC a finalisé son implication dans le projet FoCal (Forward Calorimeter), un détecteur destiné à étudier les distributions de gluons à basse fraction d'impulsion [2]. Ce projet a été marqué par plusieurs réalisations :

- Assemblage d'un démonstrateur FoCal-E : ce calorimètre électromagnétique, constitué de capteurs silicium à haute granularité, a été conçu et testé grâce au savoir-faire du LPSC.
- Caractérisation des performances : des campagnes de tests au CERN, utilisant des faisceaux de particules (15 à 200 GeV/c), ont validé les spécifications de FoCal.
- Innovations électroniques : le développement de solutions complètes, depuis l'électronique front-end jusqu'aux outils de calibration, a été mené par le service électronique du LPSC en collaboration avec le laboratoire OMEGA et la plateforme C4Pi [3].

Bien que le LPSC ait transféré ses responsabilités à d'autres laboratoires en 2023, son rôle dans le projet FoCal a été déterminant pour la finalisation du travail de R&D.

Le détecteur ITS3, prévu pour le Run 4 (2029–2032), est l'un des projets phares de la collaboration ALICE. L'objectif est de remplacer les couches internes actuelles du trajectographe par des capteurs CMOS ultra-minces et incurvés, offrant une meilleure résolution spatiale et une réduction de la masse [1]. Les contributions du groupe ALICE du LPSC incluent (voir figure 4) :

- Développement de l'électronique middle-end : ces cartes développées par le service électronique du LPSC sont situées à proximité immédiate du

détecteur. Elles intègrent les fonctions d'alimentation, de contrôle et d'acquisition de données. Leurs spécifications incluent :

- une résistance accrue aux radiations ;
  - une transmission de données optiques à haute vitesse (10,24 Gb/s).
- Intégration mécanique : le service mécanique du LPSC a conçu des solutions innovantes pour le système de refroidissement par air pulsé et

l'intégration des cartes électroniques de middle-end dans l'espace restreint du service barrel.

- R&D sur les capteurs CMOS innovants : en collaboration avec l'IPHC et l'Université de Tsukuba, le LPSC développe des prototypes de capteurs MAPS pour valider les technologies nécessaires au détecteur ITS3.

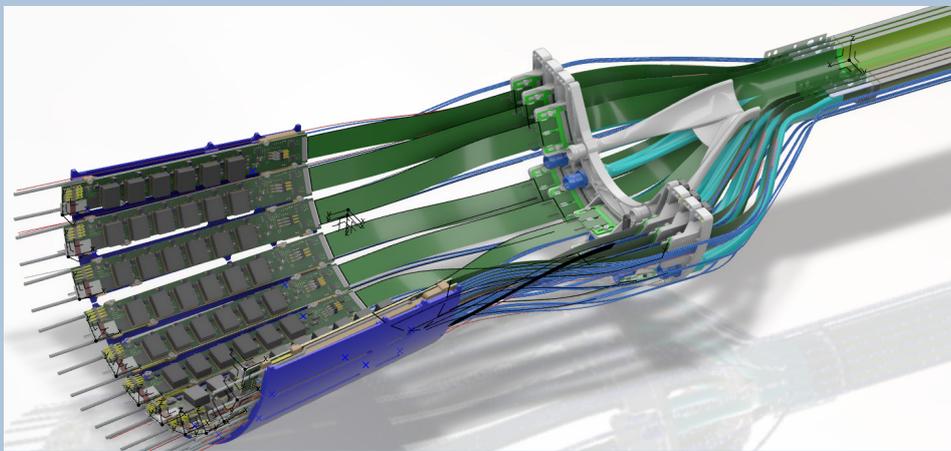


Figure 4 (Crédit : Denis Grondin, LPSC, CNRS).

Vue en perspective de l'intégration des cartes de middle-end dans le tonneau de service du système de trajectographie (ITS3) du détecteur ALICE. Les cartes chargées de convertir les signaux produits par les capteurs silicium en signal optique sont fixées au sein même du support mécanique du système de refroidissement.

## POUR EN SAVOIR+

### Thèses et HDR

- Les jets comme sonde du plasma de quarks et de gluons, Rachid Guernane, HDR soutenue le 19/12/2023, <https://hal.science/tel-04492575v1>
- Mesure des corrélations photon-hadron dans les collisions Pb-Pb à 5.02 TeV avec l'expérience ALICE au LHC, Carolina Arata, thèse soutenue le 08/10/2024, <https://theses.hal.science/tel-04891584>
- Parton energy loss mechanisms in Quark-Gluon Plasma with jet quenching using LHC-ALICE data, Takuya Kumaoka, thèse soutenue le 01/10/2024, <https://theses.hal.science/tel-04849275>

### Principales publications

1. ITS3, a bent wafer-scale monolithic pixel detector, Technical Design report for the ALICE Inner Tracking System 3, Collaboration ALICE, CERN-LHCC-2024-003, <https://cds.cern.ch/record/2890181?ln=fr>
2. The ALICE Forward Calorimeter, Collaboration ALICE, Technical Design Report of the ALICE Forward Calorimeter, CERN-LHCC-2024-004, <https://cds.cern.ch/record/2890281?ln=fr>
3. Prototype electronics for the silicon pad layers of the future Forward Calorimeter (FoCal) of the ALICE experiment at the LHC, O. Bourrion et al, 2023 JINST 18 P04031, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/04/P04031>
4. Observation of the medium-induced yield enhancement and acoplanarity broadening of low-pT jets from measurements in pp and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, Collaboration ALICE, Phys. Rev. Lett. 133, 022301, <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.022301>
5. Measurements of jet quenching using semi-inclusive hadron+jet distributions in pp and central Pb-Pb collisions  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, Collaboration ALICE, Phys. Rev. C 110, 014906, <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.110.014906>
6. Multiplicity dependence of charged jet production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, Collaboration ALICE, Eur. Phys. J. C 82 (2022) 514, <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-022-10405-x>
7. Measurement of the inclusive isolated-photon production cross section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, Collaboration ALICE, accepté par EPJ C, arXiv : <https://arxiv.org/abs/2407.01165>
8. Performance of the ALICE Electromagnetic Calorimeter, Collaboration ALICE, JINST 18 (2023) P08007, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/08/P08007>
9. Measurement of the inclusive isolated-photon production cross section in pp and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, Collaboration ALICE, soumis à EPJ C, arXiv : <https://arxiv.org/abs/2409.12641>

### Ressource Web

- <https://alice.cern>

# ÉQUIPE ATLAS

ATLAS est l'une des quatre expériences principales installées auprès du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN. Elle est dédiée à l'étude des constituants élémentaires de la matière et leurs interactions, en utilisant notamment les données produites lors de collisions de protons à une énergie égale à 13.6 TeV depuis 2022. L'équipe du LPSC, membre de la collaboration ATLAS depuis 1991, analyse ces données pour rechercher des signes de physique au-delà du modèle standard (MS) de la physique des particules. En outre, elle contribue depuis 2015 aux mises à niveau du trajectographe interne du détecteur pour la phase haute luminosité du LHC, qui débutera en 2030.

## Membres permanents

Johann Collot, Sabine Crépe-Renaudin (en détachement à la direction de l'IN2P3), Pierre-Antoine Delsart, Marie-Hélène Genest, Fabienne Ledroit-Guillon, Fairouz Malek, Benjamin Trocmé (jusqu'en décembre 2023), Jean-Baptiste de Vivie de Régie (responsable d'équipe).

## Membres non permanents

Guillaume Albouy (doctorant), Nathan Lalloué (doctorant), Ana Peixoto (post-doctorante), Luka Selem (post-doctorant), Shohei Shirabe (post-doctorant), Thomas Wojtkowski (doctorant).

## Personnels des services techniques

Denis Grondin, Nicolas Emeriaud (Service Études et Réalisations Mécaniques), Ludovic Eraud, Nicolas Ponchant (Service électronique), Marc Marton, Abdelkader Mohammed-Matallah, Adeline Richard, Murielle Rousseau, Yoann Sallaz-Damaz, Patrick Stassi, Olivier Zimmerman (Service Détecteurs et Instrumentation). Jérôme Fulachier, Fabian Lambert, Jérôme Odier (Service informatique).

## Traitement des données : AMI

Depuis plusieurs années une équipe de trois ingénieurs du service informatique du LPSC développe un environnement logiciel de base de données dédié aux méta-données scientifiques. Cet environnement,

*ATLAS Metadata Interface (AMI)*, est utilisé par la collaboration pour deux applications critiques : la collecte et la disponibilité des méta-données d'ATLAS (simulation et données) et les paramètres de configuration des programmes de calculs (simulation, reconstruction, analyse). Outre la maintenance des logiciels et de l'intégrité des données, l'équipe a effectué d'importants travaux de développements, rénovant entièrement le cœur logiciel, le rendant entièrement indépendant. Les développements récents sont détaillés dans le chapitre du service informatique du laboratoire.

## Activités instrumentales

### Le trajectographe interne ITk

L'équipe ATLAS du LPSC est engagée depuis 2015 dans le projet ITk (Inner Tracker), plus précisément dans sa partie la plus interne, qui sera un détecteur à pixels. Il s'agit en effet de remplacer entièrement le trajectographe actuel, qui ne pourra pas soutenir l'accroissement de la dose de rayonnement au LHC haute luminosité (HL-LHC), par un nouveau détecteur entièrement constitué de capteurs en silicium. Celui-ci devra être installé et testé à temps pour le démarrage du HL-LHC, prévu en 2030.

Le LPSC est engagé dans trois activités : le 'loading' des modules de détection sur les supports mécaniques locaux, la conception des supports intermédiaires, pièces qui permettront d'assembler les supports locaux en trois couches de détection cylindriques concentriques, qui forment la partie appelée 'Outer Barrel' (OB) du détecteur à pixels, et les 'services' dits de type-1.

Afin de pouvoir démonter un module défectueux après assemblage et test d'un support mécanique chargé complet, la communauté OB a développé le concept de cellule, une petite tuile de graphite pyrolytique sur laquelle chaque module sera collé, et qui sera vissée sur le support local. L'équipe du LPSC a choisi le distributeur automatique comme outil d'encollage, en collaboration avec le CPPM (Marseille), avec qui elle travaille également au développement de l'outil de pressage du module sur la cellule. Un chantier important des trois dernières années a été la construction du banc de tests (figure 1), et le

développement de plusieurs logiciels permettant son pilotage.

Ce banc, identique dans les six sites de loading, qui permet de tester quatre modules en parallèle, servira à la fois aux tests électriques des modules à réception et aux tests thermiques après collage. Le LPSC s'est chargé, en collaboration avec le CERN et pour toute la communauté, de l'écriture du programme de contrôle des conditions de test et du système de sécurité, ainsi que de l'automatisation des tests électriques, depuis leur configuration

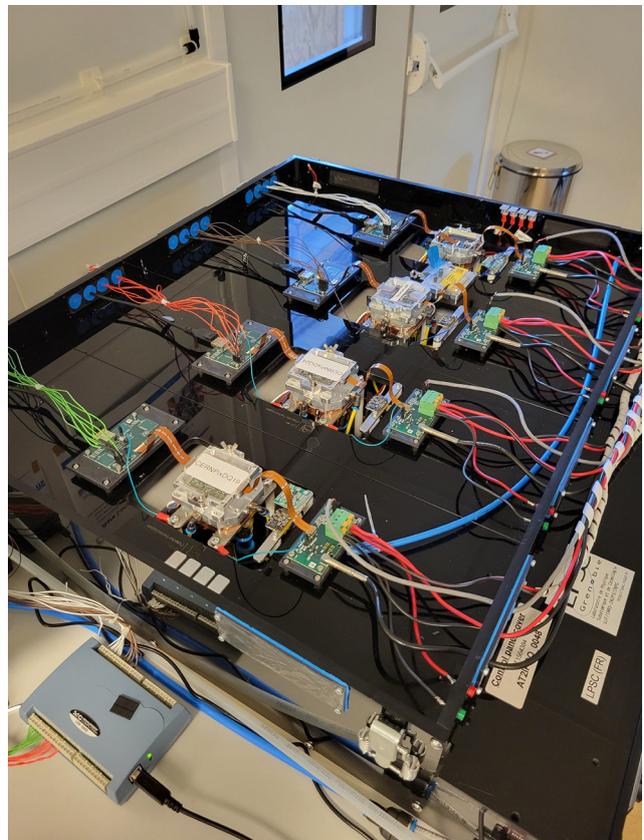


Figure 1 (Crédit : Service Détecteurs et Instrumentation, LPSC, CNRS).

Banc de tests électriques et thermiques pour quatre modules en parallèle.

jusqu'à l'enregistrement des résultats dans la base de données de production de l'ITk. L'assurance qualité a été intégrée à toutes les procédures grâce à une application sur tablette qui permet à la fois d'enregistrer les paramètres des opérations et de guider l'opérateur dans ses tâches, via des rappels de procédure et la validation de chaque étape dans un ordre précis. L'installation de tous les outils dans la salle blanche dans laquelle se déroulera la production a été faite en 2024 et le site a été qualifié par les responsables de ce livrable pour la collaboration. L'équipe est prête à démarrer la production en 2025, pour une durée de 18 mois.

Les supports intermédiaires sont des pièces fabriquées en matériau composite de sorte à minimiser la matière introduite dans le détecteur tout en fournissant solidité et rigidité. Leur dessin est maintenant mature et sera finalisé après obtention du modèle final du détecteur complet par le CERN, ce qui nécessite d'avoir achevé le routage des 'services', qui sont les différents câbles et tubes permettant au détecteur de communiquer avec l'extérieur. En attendant, les tests de qualification thermomécaniques (résistance à la traction, déformation en cyclage thermique) ont donné des résultats conformes aux spécifications avec des prototypes fabriqués par un industriel (figure 2). La revue finale de conception (FDR) a également été passée avec succès. En parallèle, une méthode de fabrication unitaire alternative a été développée par le LPSC, qui nécessite de dessiner et de fabriquer au laboratoire tous les moules et supports, et demande un savoir-faire spécifique pour le drapage du tissu pré-imprégné, avant le passage en autoclave (qui reste externalisé). Cette méthode a finalement convergé en 2024 et donne apparemment de meilleurs résultats dimensionnels que celle du prestataire. Si cela est confirmé et validé par la collaboration, elle pourra être utilisée en cas de défaillance du sous-traitant (ou en cas de nécessité de pièces supplémentaires de secours). Les démarches administratives nécessaires au passage d'une commande d'un montant d'au moins 135 k€ ont abouti à un accord pour une procédure de marché passé sans publicité ni mise en concurrence préalable. Le règlement de consultation et le cahier des clauses techniques particulières sont quasiment prêts (en attente du design final du OB), la production pourra être lancée en 2025, conformément à la version actuelle du planning.

Le troisième engagement du LPSC dans le projet ITk est la responsabilité pour l'OB des services de



Figure 2 (Crédit : Service Etudes et réalisations mécaniques, LPSC, CNRS).

Prototype de support intermédiaire complet après boulonnage de ses deux pièces.

type-1, qui sont des faisceaux de câbles concentrant les transmissions de puissance et de signaux électriques entre les supports locaux et des connecteurs étanches situés sur l'enceinte du détecteur<sup>1</sup>. Ils alimentent les modules en haute tension pour la polarisation du capteur, en basse tension pour les puces de lecture et de contrôle, et transmettent les données de contrôle et la température. La FDR pour ces services a été passée avec recommandations en 2022, validant la conception des câbles et des petits circuits imprimés permettant de les connecter côté modules. La revue avait néanmoins été passée sans le connecteur circulaire de l'autre extrémité, par manque de prototype. Cette lacune a été comblée en 2023. La même année, tous les composants ont été validés après irradiation et en 2024, le premier prototype complet a été fabriqué par l'entreprise identifiée pour la production. Un autre développement qui restait à compléter était le dispositif de soulagement des contraintes à chaque extrémité. Ceci est réalisé en recouvrant les soudures sur les petits PCBs avec de l'Araldite 2011 et, à l'autre extrémité, en attachant tous les fils du faisceau à une pièce spéciale vissée sur le connecteur, après les avoir englués de la même colle (figure 3). Un suivi des recommandations de la FDR a été effectué en novembre 2024 à la suite duquel le design complet a été approuvé, donnant le feu vert pour démarrer la préproduction.

<sup>1</sup> Le LPSC a également participé à la conception du câble de transmission des données du capteur jusqu'au début de 2023, bien que cela ne fasse pas partie des engagements de l'IN2P3.

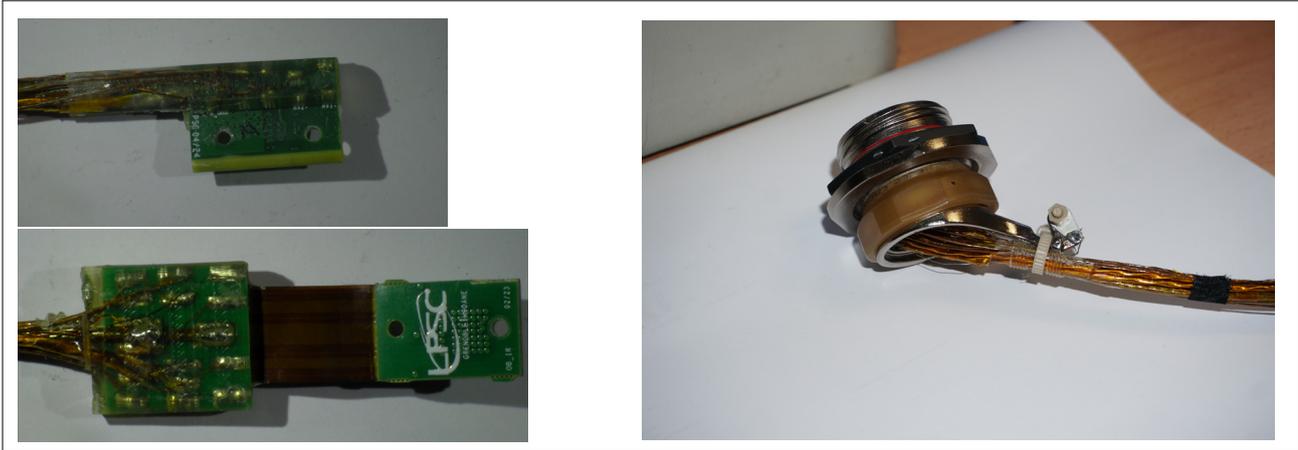


Figure 3 (Crédit : Service Électronique, LPSC, CNRS).

Terminaisons d'un prototype complet de faisceau de type-1. À droite : les deux sortes de petits PCBs utilisés à l'extrémité du côté des modules. À gauche : le connecteur circulaire de l'autre extrémité, équipé de sa pièce de soulagement des contraintes.

### Reconstruction et étalonnage de l'énergie et de la masse des jets

En lien avec les analyses de recherche, l'équipe maintient une forte activité sur le sujet des performances de reconstruction des jets hadroniques. Les implications de l'équipe sont multiples, mais elles ont essentiellement porté sur trois aspects. Le premier est l'amélioration de la reconstruction des constituants des jets à partir des signaux expérimentaux primaires que sont les traces et dépôts d'énergie dans les calorimètres. En particulier, au sein de l'ANR DMwithLLPatLHC approuvée en 2021, un travail de R&D est en cours visant à une calibration de ces constituants grâce à des techniques avancées d'intelligence artificielle. Le deuxième point est la calibration en énergie et en masse des jets eux-mêmes : l'équipe a développé une technique de réseau de neurones spécifique à ce problème (figure 5). Cette approche très performante (figure 5) a été adoptée par la collaboration ATLAS et a fait l'objet d'une publication [3]. Enfin le troisième point concerne le développement et la maintenance des systèmes logiciels pour les jets au sein de la collaboration.

### Refroidissement par CO<sub>2</sub> diphasique

Depuis 2016, le LPSC est partenaire du CERN dans la conception et le prototypage du système de réfrigération du trajectographe d'ATLAS. Ce système utilise une boucle de dioxyde de carbone diphasique dont la pression et la température (jusqu'à -45 °C) sont pilotées par un réservoir de 400 litres en inox, sous pression, appelé accumulateur. Le premier accumulateur conçu et construit par le LPSC a été livré au CERN en janvier 2022. Il comporte plus de 300 composants soudés sur tuyauterie à haute pression (100 bars). Son intégration au CERN au

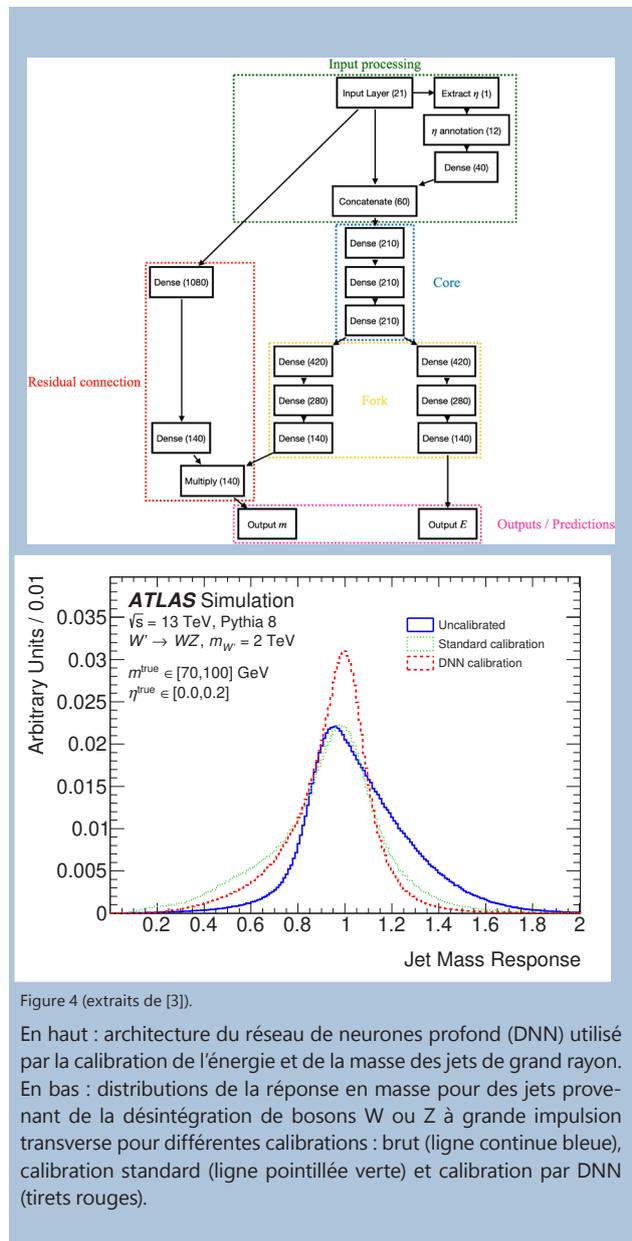


Figure 4 (extraits de [3]).

En haut : architecture du réseau de neurones profond (DNN) utilisé par la calibration de l'énergie et de la masse des jets de grand rayon. En bas : distributions de la réponse en masse pour des jets provenant de la désintégration de bosons W ou Z à grande impulsion transverse pour différentes calibrations : brut (ligne continue bleue), calibration standard (ligne pointillée verte) et calibration par DNN (tirets rouges).

sein de la première station de refroidissement nommée DEMO a eu lieu en février 2022. La mise en service et l'optimisation de DEMO se sont fructueusement déroulées en 2022 et 2023 (figure 5). La station DEMO est désormais utilisée par ATLAS pour tester les détecteurs. Six stations de la sorte seront nécessaires pour réguler la température du futur trajectographe (entre autre) ; les accumulateurs seront produits dans l'industrie en Suède. Aujourd'hui, une station sur six pour ATLAS, et trois sur huit pour CMS (une autre grande expérience du LHC), sont en cours d'installation dans les cavernes.



Figure 5 (Crédit : Yann Herpin, LPSC, CNRS).

Accumulateur en cours de test à froid au CERN dans la station DEMO. À gauche : le connecteur circulaire de l'autre extrémité, équipé de sa pièce de soulagement des contraintes.

### Reconstruction des électrons et photons et étalonnage de leur énergie

L'estimation précise de l'énergie des électrons et photons est essentielle pour les mesures fines dans le cadre du MS et la recherche de nouvelle physique aux plus hautes énergies. L'équipe a pris une part importante dans ces études, en particulier l'étalonnage relatif des énergies reconstruites dans les deux couches principales du calorimètre électromagnétique ; elle a en outre contribué à la mise à jour des logiciels pour prendre en compte les nouveaux résultats [4]. Une application de cette analyse est la mesure de la masse du boson de Higgs, avec une précision meilleure qu'un pour mille.

### Recherche de nouvelle physique dans le secteur de Higgs

Le secteur de la saveur est l'un des moins bien compris de la physique des particules et est fortement lié au secteur de Higgs. Dans le MS, à l'ordre dominant, il n'existe pas d'interaction (dite «via FCNC») entre deux quarks de même charge électrique et un boson neutre (scalaire, Higgs, ou vecteur, Z, photon ou gluon). Ces interactions pour des quarks de charge  $2/3$  sont cependant très peu contraintes expérimentalement. La découverte du boson de Higgs de masse 125 GeV a ouvert la possibilité de rechercher des signes de la désintégration du quark top en un boson Higgs et un quark charmé ou up, exemple typique d'une telle interaction FCNC. Le MS prédit un taux de ce processus extrêmement petit (de l'ordre de  $10^{-15}$ ) pour  $t \rightarrow cH$ . Ce taux peut être considérablement accru dans des modèles de nouvelle physique. L'équipe s'est impliquée dans la recherche de ce processus, lorsque le boson de Higgs se désintègre en une paire de photons. L'analyse des données du Run II du LHC n'a révélé aucun excès significatif (figure 6), et a permis de déterminer une limite supérieure sur le rapport d'embranchement du processus  $t \rightarrow cH$  de  $4.3 \times 10^{-4}$  à 95 % de niveau de confiance [5].

### Matière noire et QCD sombre

L'équipe est principalement impliquée depuis quelques années dans la recherche de nouveaux quarks, dits sombres, chargés sous une symétrie de jauge ressemblant à la chromodynamique quantique, et ne se couplant au MS que via de nouveaux bosons, comme une particule Z'. Dans le cadre de tels modèles de secteur sombre, ces nouveaux quarks peuvent être produits dans les collisions du LHC via le nouveau médiateur. Ils subiraient alors une hadronisation sous l'interaction sombre pour former des hadrons sombres interagissant très peu avec la matière ordinaire et dont les états stables pourraient être

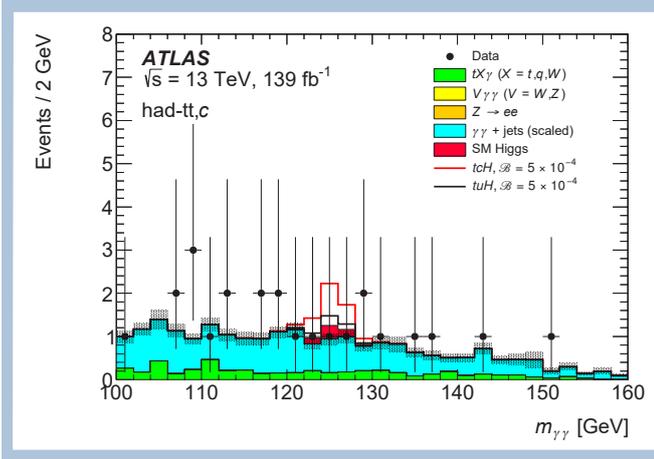


Figure 6 (extraits de [5]).

Exemple de distributions de la masse invariante des deux photons pour les données (points noirs), le signal FCNC recherché avec un rapport d'embranchement du processus  $t \rightarrow qH$  de  $5 \times 10^{-4}$  (lignes noire et rouge), le bruit de fond dû à la production standard de bosons de Higgs et le bruit de fond non résonnant.

candidats à la matière noire de l'univers. Les hadrons sombres instables, quant à eux, se désintègreraient en quarks standards qui s'hadroniseraient à leur tour. Cette double hadronisation ainsi que des possibles temps de vie non négligeables donnent aux jets de hadrons issus de ces quarks sombres des caractéristiques différentes de celles des jets issus de quarks standards. Ce sont ces objets qui forment le signal caractéristique recherché, également décrit dans un article de phénoménologie auquel ont participé des membres de l'équipe. Ce travail se fait dans le cadre de l'ANR DMwithLLPatLHC.

Dans les données du Run II du LHC, l'équipe s'est intéressée à la recherche de ces modèles dans le cas d'un temps de vie négligeable des hadrons sombres. Dans ce cas, les jets produits ont beaucoup plus de traces associées dans le trajectographe interne que les jets provenant de processus du MS (figure 7, gauche). La production du médiateur  $Z'$  et sa désintégration en quarks sombres peut être alors recherchée comme une résonance dans le spectre de masse invariante de tels jets.

Cette analyse a récemment fait l'objet d'une publication ATLAS [2] : aucun excès significatif n'ayant été observé dans les données (figure 7, droite), des contraintes ont été mises sur ces modèles, pour la première fois. Les recherches de QCD sombre font également l'objet d'une section d'un article édité par un membre de l'équipe résumant l'ensemble des recherches exotiques du Run II d'ATLAS [1].

Au Run III, l'équipe se concentre sur le cas où les temps de vie des hadrons sombres légers sont non-négligeables. La signature est la présence de jets émergents : les gerbes hadroniques commencent à se développer dans le trajectographe interne, loin du point d'interaction des protons du faisceau. Cela mène à des jets dans lesquels se trouvent de nombreux vertex déplacés, une signature ayant très peu de bruit de fond provenant du MS. Cette analyse, novatrice au LHC pour un médiateur  $Z'$ , est en cours dans la collaboration ATLAS, bénéficiant de nouvelles sélections au niveau du système de déclenchement mises en place au début du Run III.

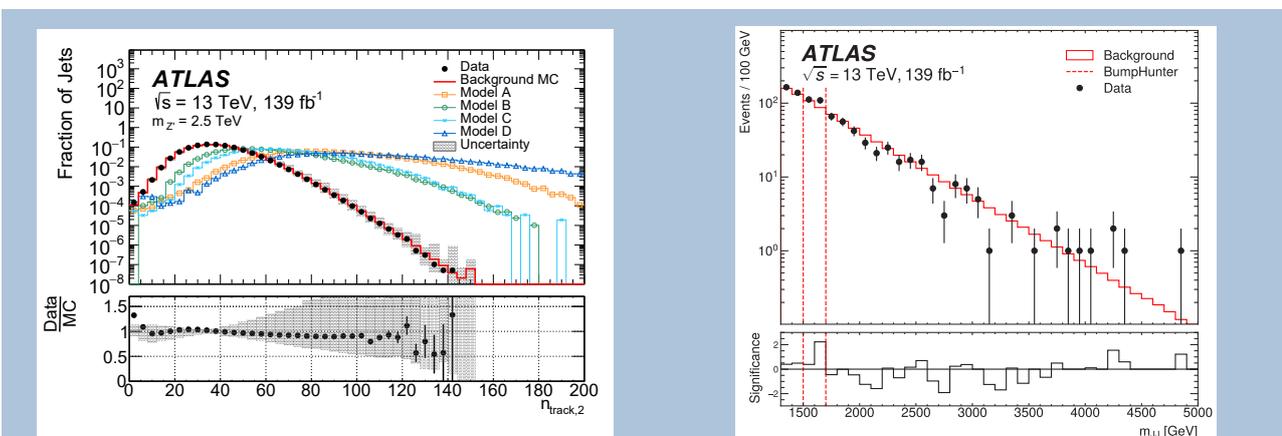


Figure 7 (extraits de [2]).

À gauche : nombre de traces associées au second jet pour les données (points noirs) et le bruit de fond du modèle standard (ligne rouge), comparé à celui attendu pour différents modèles de QCD sombre (histogrammes colorés). Le graphique du bas montre le rapport entre les données et le bruit de fond attendu ainsi que l'incertitude associée. À droite : distribution, dans les données (points noirs) de la masse invariante des deux jets sélectionnés par l'analyse comparée à celle attendue pour le bruit de fond (ligne rouge). Le graphique du bas montre la signification statistique et l'intervalle le plus significatif, indiqué par les lignes pointillées, a une valeur p globale de 63 % : aucun excès significatif n'est donc observé.

Par ailleurs, un travail de ré-interprétation des analyses liées à la QCD sombre est en cours dans le cadre du projet ANR, avec comme objectif de vérifier la couverture des analyses existantes pour les différents scénarios de QCD

sombre. Cela permettra de possiblement identifier des régions de l'espace des paramètres moins bien couvertes et d'aider à la définition de modèles de référence communs avec CMS.

## POUR EN SAVOIR +

### Thèses

- Recherche de jets émergents dans le cadre des modèles de QCD sombre avec le détecteur ATLAS pendant le Run-3 du LHC, Guillaume Albouy, Université Grenoble Alpes, 2024, <https://cds.cern.ch/record/2919027>
- Recherche d'un secteur sombre avec le détecteur ATLAS, Nathan Lalloué, Université Grenoble Alpes, 2022, <https://theses.fr/2022GRALY054>

### Principales publications

1. Exploration at the high-energy frontier: ATLAS Run 2 searches investigating the exotic jungle beyond the Standard Model, la collaboration ATLAS, 2403.09292, <https://inspirehep.net/literature/2768782>
2. Search for resonant production of dark quarks in the dijet final state with the ATLAS detector, la collaboration ATLAS, JHEP02(2024)128, <https://inspirehep.net/literature/2719976>
3. Simultaneous energy and mass calibration of large-radius jets with the ATLAS detector using a deep neural network, la collaboration ATLAS, Mach.Learn.Sci.Tech. 5 (2024) 3, 035051, <https://inspirehep.net/literature/2722720>
4. Electron and photon energy calibration with the ATLAS detector using LHC Run 2 data, la collaboration ATLAS, JINST 19 (2024) P02009, <https://inspirehep.net/literature/2696998>
5. Search for flavour-changing neutral tqH interactions with  $H \rightarrow \gamma\gamma$  in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector, la collaboration ATLAS, JHEP12(2023)195, <https://inspirehep.net/literature/2702149>
6. Luminosity determination in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector at the LHC, la collaboration ATLAS, Eur. Phys.J.C 83 (2023) 10, 982, <https://inspirehep.net/literature/2616000>
7. Report of the Topical Group on Physics Beyond the Standard Model at Energy Frontier for Snowmass 2021, T. Bose et al., 2209.13128, <https://inspirehep.net/literature/2157249>
8. High Luminosity LHC: Prospects for New Physics, M.-H. Genest et al., dans The future of the Large Hadron Collider, <https://inspirehep.net/literature/2694870>

### Ressources Web

- ATLAS, site public : <https://atlas.cern>
- ATLAS-LPSC : [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=143](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=143)
- ANR DMwithLLPatLHC : <https://mgenest.web.cern.ch/DMwithLLPatLHC.html>

# ÉQUIPE DE PHYSIQUE THÉORIQUE

La physique théorique a comme objectif la construction de modèles mathématiques aussi simples et complets que possible, capables de rendre compte d'un maximum de phénomènes physiques à partir d'un minimum de paramètres libres. En physique des particules, ces modèles décrivent les constituants élémentaires et leurs interactions, et en cosmologie l'évolution du contenu et de la géométrie de l'univers. Dans ce contexte, le siècle dernier a vu l'avènement des modèles standards de la physique des particules et de la cosmologie. Outre le problème de leur unification, de nombreuses questions restent ouvertes, nécessitant en général un élargissement de ces cadres théoriques, en incluant de nouvelles interactions ou formes de matière. Nos travaux visent à analyser ces modèles standards, développer leurs extensions et étudier les signatures expérimentales associées.

## Membres permanents

Aurélien Barrau, Mariane Mangin-Brinet, Sabine Kraml, Killian Martineau, Jérémie Quevillon (en détachement au CERN d'août 2022 à septembre 2023, mutation au LAPTh ensuite), Ingo Schienbein, Christopher Smith (responsable d'équipe).

## Membres non permanents

Gaël Alguero (doctorant), Mohamad Altakach (post-doctorant), Fernando Arias-Aragon (post-doctorant), Théo Brugeat (doctorant), Leo Constantin (doctorant), Maxime Desousa (doctorant), Thomas Guerandel (doctorant), Pierre Jamet (ATER), Rémy Larue (doctorant), Chloé Léger (doctorante), Rafal Maselek (post-doctorant), Timothée Pascal (doctorant), Cypris Plantier (doctorant), Cyril Renevey (doctorant), Lohan Sartore (ATER), Diego Saviot (doctorant), Martin Teuscher (doctorant), Hoa Vuong (doctorant).

# Phénoménologie BSM et (ré)interprétation des résultats du LHC

Après la découverte du boson de Higgs, la recherche de nouvelle physique est devenue l'objectif principal du programme de physique du LHC. Pour cela, les expériences LHC poursuivent un vaste programme de mesures de précision de processus connus ainsi que des recherches directes de nouvelles particules ou d'autres phénomènes nouveaux. Les analyses expérimentales interprètent leurs résultats en termes du modèle standard (SM) et/ou de scénarios populaires/simplifiés au-delà du modèle standard (BSM). La tâche des physiciens théoriciens est alors d'étudier les implications dans des cadres théoriques plus vastes (théories de champs effectives ou complètes dans l'ultra-violet) et de fournir des contraintes sur des scénarios BSM au-delà de ceux usuellement considérés. Ce travail motive également le calcul de prédictions théoriques plus précises lorsque cela est nécessaire. L'équipe est grandement impliquée dans ces efforts ainsi que dans le développement des logiciels publics associés.

L'un de ces outils publics co-développé par notre groupe est SModelS, un framework Python pour la réinterprétation rapide des recherches sur le LHC basées sur des résultats de modèles simplifiés. Au

cours de la période 2022-2024, SModelS a connu plusieurs extensions et améliorations majeures. Il s'agit par exemple d'importantes mises à jour de bases de données (couvrant désormais un total de 125 analyses), de l'introduction d'une classe de particules permettant un meilleur traitement des recherches de particules à vie longue, d'un traitement statistique amélioré permettant des analyses de vraisemblance globale (thèse de Timothée Pascal), et enfin une refactorisation complète du code et de la base de données pour introduire une description de topologie basée sur des graphes. Chaque nouveauté majeure a donné lieu à une nouvelle version accompagnée d'une publication.

Côté phénoménologie, nous avons utilisé SModelS pour effectuer la première combinaison globale de recherches électrofaibles ATLAS et CMS (figure 1 à gauche). Concrètement, nous avons étudié quelles combinaisons maximisent la sensibilité dans différentes régions de l'espace des paramètres, comment les fluctuations des données dans les analyses individuelles influencent la vraisemblance globale et quel est le pouvoir d'exclusion résultant de la combinaison par rapport à l'approche analyse par analyse (thèse de Timothée Pascal). De même, nous avons utilisé les capacités de la nouvelle description de topologie basée sur des graphes pour réaliser une étude complète d'un modèle de matière noire à deux médiateurs, combinant les contraintes du LHC liées aux recherches d'énergie manquante et de résonance (figure 1 à droite).

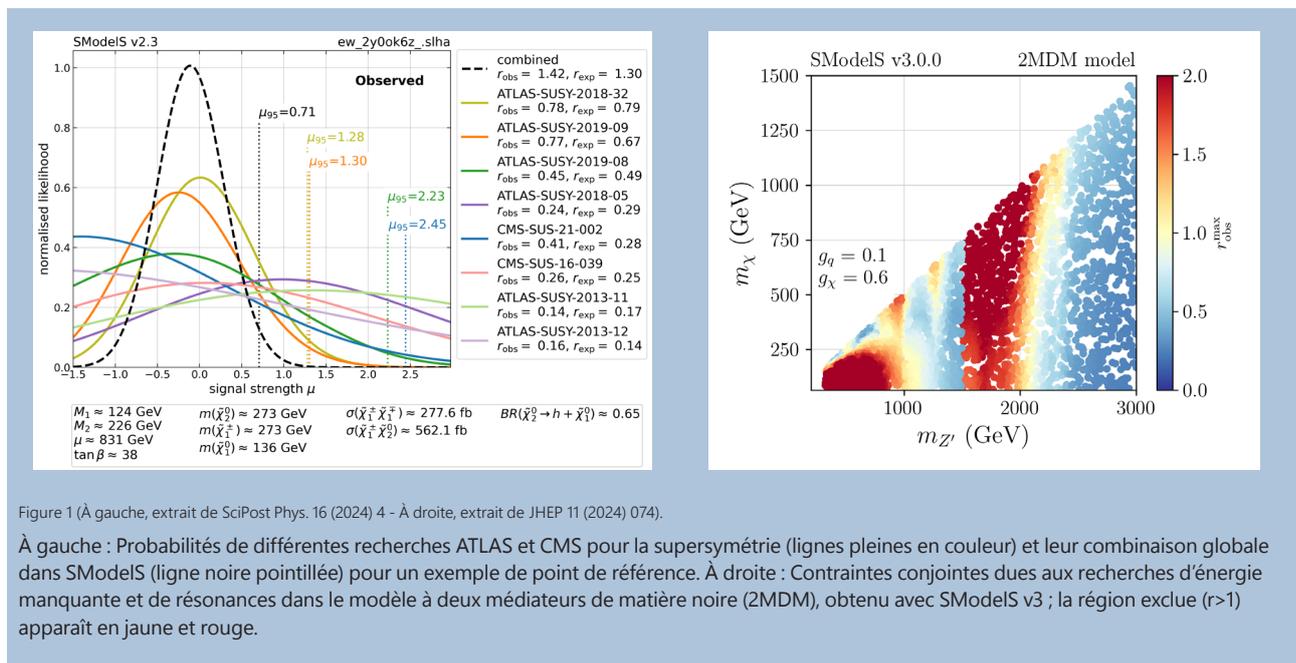


Figure 1 (À gauche, extrait de SciPost Phys. 16 (2024) 4 - À droite, extrait de JHEP 11 (2024) 074).

À gauche : Probabilités de différentes recherches ATLAS et CMS pour la supersymétrie (lignes pleines en couleur) et leur combinaison globale dans SModelS (ligne noire pointillée) pour un exemple de point de référence. À droite : Contraintes conjointes dues aux recherches d'énergie manquante et de résonances dans le modèle à deux médiateurs de matière noire (2MDM), obtenu avec SModelS v3 ; la région exclue ( $r > 1$ ) apparaît en jaune et rouge.

En restant avec des modèles motivés par la matière noire, nous avons réalisé une étude pour le modèle de matière noire singulet-triplet avec un accent particulier sur la transition de la co-annihilation à la co-diffusion comme production dominante de matière noire (thèse de G. Alguero). À cette fin, le mécanisme de co-diffusion a été implémenté dans micrOMEGAs (finalement micrOMEGAs6). Les signatures au LHC dans la région paramétrique pertinente sont caractérisées par des particules chargées à longue durée de vie, qui ont de nouveau été évaluées avec SModels.

Les secteurs de Higgs étendus constituent une autre ligne d'intérêt du groupe. Ici, nous avons étudié par exemple le lien entre la phénoménologie des collisionneurs et de la matière noire dans l'extension

singulet du modèle Georgi-Machacek (collaboration indo-française avec la regrettée Prof. Rohini Godbole et al.).

Enfin, avec l'arrivée d'un post-doctorant financé par l'IN2P3 en 2023 (R. Maselek), nous avons ouvert une nouvelle ligne de recherche concernant l'apprentissage automatique en théorie et phénoménologie des particules. Cette activité a connu un fort essor avec plusieurs articles publiés ou en préparation, et a donné lieu à de nouvelles collaborations fructueuses au niveau national et international.

En outre, le groupe est resté fortement engagé dans des groupes de travail internationaux sur les sujets ci-dessus, y compris l'exercice de planification communautaire « Snowmass » aux États-Unis.

## Détermination de distributions de partons

L'une des activités principales de recherche de l'équipe du LPSC concerne l'étude de la structure des nucléons et noyaux complexes. Ces systèmes sont caractérisés par leurs distributions de partons (PDF) qui, intuitivement, décrivent en détails leur constitution en quarks et en gluons. Ces PDF sont d'une importance primordiale pour la physique des hautes énergies, qui se concentre sur l'étude des interactions entre particules élémentaires, et est indispensable pour exploiter au mieux les résultats expérimentaux des collisionneurs hadroniques tels le LHC ou le futur EIC (electron-ion collider).

Au cours de ces trois dernières années, l'objectif principal a été de préparer la nouvelle analyse globale des PDFs nucléaires, qui sera publiée en 2025 (nCTEQ2025). À cet égard, nous avons étudié l'influence des données du LHC sur la production des quarks lourds et leur impact sur la densité du gluon. Un autre processus sensible à cette densité gluonique est la production des photons prompts (thèse de C. Léger, en cours de rédaction). Dans une étude très détaillée, nous avons examiné la compatibilité des données de diffusion profondément inélastique neutrino-noyau avec les données électron-noyau, afin de déterminer lesquelles de ces données seront

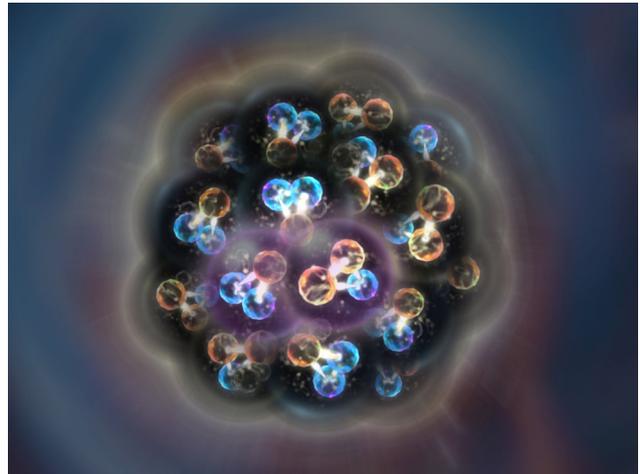


Figure 2 : modèle hybride (C crédit : Institut de Physique Nucléaire, Académie Polonaise des Sciences).

Une nouvelle description des noyaux combine le modèle quark-gluon de la physique des particules avec la description proton-neutron de la physique nucléaire. Dans cette illustration d'artiste, les quarks sont représentés par les petites sphères, montrées interagissant via des gluons pour créer des nucléons. Une paire temporaire de nucléons corrélés est mise en évidence en violet.

incluses dans l'analyse globale nCTEQ2025. De plus, nous avons rédigé un grand article de synthèse sur les corrections liées à la masse de la cible dans la diffusion profondément inélastique lepton-noyau, en mettant un accent particulier sur le cas nucléaire. Dans un autre article, en lien indirect avec la structure hadronique, nous avons proposé un nouveau schéma de factorisation pour des processus impliquant des fonctions de fragmentation au prochain ordre dominant (NLO).

Enfin, nous souhaitons souligner une étude récente de notre collaboration nCTEQ, publiée dans Physical Review Letters. Cette étude introduit un nouveau

paradigme permettant une interprétation directe des nPDFs. Dans cette approche, les PDFs nucléaires sont exprimées comme des combinaisons linéaires des PDFs des protons et des neutrons ainsi qu'une contribution universelle des paires SRC (Short-Range Correlated), commune à tous les noyaux (voir figure 2.). Fait remarquable, cette approche innovante offre une description améliorée des PDFs nucléaires par rapport aux paramétrisations traditionnelles. De plus, elle permet d'extraire le nombre de nucléons liés en

paires SRC, ce qui peut être comparé aux valeurs obtenues à partir d'autres mesures nucléaires indépendantes. Cette étude a été mise en avant dans plusieurs communiqués de presse grand public :

- <https://physicsworld.com/a/two-distinct-descriptions-of-nuclei-unified-for-the-first-time/>
- <https://phys.org/news/2024-10-coherent-picture-atomic-nucleus-quarks.html> ce communiqué a été partagé plusieurs fois).

## Détermination des amplitudes de distribution des mésons

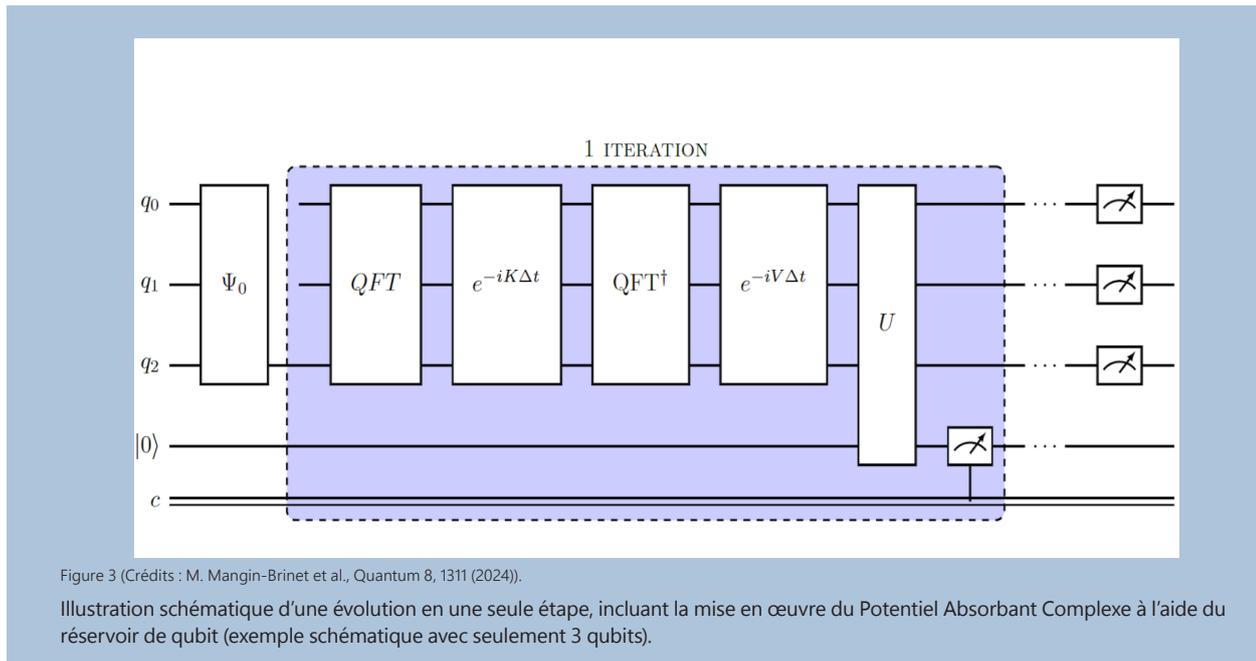
Le projet principal développé en QCD sur réseau concerne la détermination des amplitudes de distribution (DA) des mésons (pion, kaon, charmonium...) à partir des premiers principes de la QCD. La structure interne des mésons joue en effet un rôle fondamental en QCD et leur impact sur les mesures expérimentales fait l'objet de nombreuses études. Parmi elles, le processus de désintégration exclusive d'un boson de Higgs avec un quarkonium dans l'état final, permet d'étudier finement si le couplage du boson de Higgs aux quarks c et b est de nature « standard » ou s'il est objet d'une nouvelle physique.

Pour déterminer les amplitudes de distribution, le formalisme de la théorie des champs sur le cône de lumière est particulièrement bien adapté, mais il s'avère que les approches basées sur des troncatures ou des calculs perturbatifs réalisés en dehors de leur domaine de validité – comme c'est le cas par exemple pour la QCD non-relativiste ou pour les équations de Schwinger-Dyson – sont entachées d'erreurs systématiques difficilement contrôlables. Par ailleurs, le fait que ces DA soient définies sur le cône de lumière exclut de pouvoir les calculer directement sur réseau. Cette difficulté est longtemps restée insurmontable, jusqu'à la formulation de la méthode des « pseudo-distributions », qui généralise la définition des DA à des intervalles de type espace et fournit un algorithme qui permet de retrouver la physique sur le cône de lumière en prenant une certaine limite. C'est cette approche des « pseudo-DA », particulièrement ingénieuse que nous utilisons pour déterminer les amplitudes de distributions des mésons. Ce travail est mené dans le cadre d'une collaboration avec des collègues de l'IJClab ; il a fait l'objet de plusieurs publications et présentations à des conférences internationales.

## Simulation de systèmes physiques sur ordinateur quantique

Le calcul quantique est une activité fascinante en plein essor, à l'interface entre les mathématiques,

l'informatique et la physique. Une nouvelle activité a démarré récemment dans ce domaine, avec comme fil directeur la simulation des systèmes physiques sur ordinateur quantique (voir figure 3). Une collaboration a été initiée avec l'IJCLab, ainsi qu'une participation au projet QC2I de l'IN2P3, au projet HQI du CEA et au projet Initiative QC4HEP du CERN. Un premier travail concernant la simulation de l'évolution des systèmes ouverts sur ordinateur quantique a donné lieu à une publication, et un second projet est en cours, qui concerne la simulation de la dynamique de saveurs des neutrinos dans les milieux denses.



## Physique des axions

Un des problèmes les plus sérieux du Modèle Standard est sa prédiction naturelle de violation CP par les interactions fortes. Celle-ci induirait un moment dipolaire électrique (EDM) pour le neutron, sur lequel des limites expérimentales toujours plus strictes sont posées. Dans le cadre du SM, une telle absence de signal requiert une compensation quasi parfaite, d'une part sur dix milliards, entre la violation CP venant du couplage des quarks au boson de Higgs et celle venant de la topologie gluonique de QCD, deux secteurs du SM sans aucun lien dynamique connu ou même supposé. Introduire l'axion permet de contourner le problème, car son existence découle du mécanisme de Peccei-Quinn, garantissant automatiquement l'absence de violation CP forte. D'un point de vue cosmologique, ce mécanisme a de plus l'intérêt de pouvoir expliquer l'existence d'une densité relique de matière noire.

Nos travaux sont d'une part phénoménologiques, étudiant les stratégies de recherche de l'axion, et d'autre part théoriques, construisant des modèles où l'axion joue également un rôle dans la résolution d'autres énigmes du SM. Concernant le premier point, nous avons revu les couplages axion-fermions dans la limite non-relativiste, et identifié un couplage « oublié », mais permettant en principe de détecter un fond d'axions de matière noire via des moments électriques dipolaires (EDM) oscillants. Intuitivement, ce résultat est

l'analogie de la prédiction bien connue d'un moment magnétique égal à deux par l'équation de Dirac pour tous les fermions chargés et massif. L'axion agit comme une masse pseudoscalaire dans l'équation de Dirac, qui produit alors automatiquement un moment électrique, dual du moment magnétique.

Du point de vue théorique, une des questions poursuivies part de l'observation que la symétrie à la base du mécanisme axionique est, in fine, une symétrie de saveur, au même titre que les nombres baryonique (B) et leptonique (L). Cette observation est intéressante car lier l'axion, motivé par la symétrie CP, au nombre baryonique pourrait lui permettre de jouer un rôle central dans la baryogénèse, et le lier au nombre leptonique peut lui donner la responsabilité de générer les masses des neutrinos. Ces questions ont été analysées de manière effective, en théorie de grande unification, et en présence de leptoquarks/diquarks, et la phénoménologie associée, en particulier pour l'oscillation neutron-antineutron, est en cours d'étude.

En parallèle, notre équipe a rejoint la collaboration GrAHal, qui vise à développer puis opérer un haloscope à Grenoble. La mise en service d'un aimant hybride au LNCMI, capable de maintenir un champ magnétique intense sur un volume conséquent, permet en principe d'atteindre des sensibilités de détection d'axion très compétitives à l'échelle mondiale, dans la plage de masse de 1 à 100 meV, qui est la plus intéressante car permettant d'expliquer la densité relique observée de matière noire.

## Physique de l'univers primordial

La gravitation quantique à boucles est une des théories majeures actuellement considérées pour tenter de concilier la relativité générale et la mécanique quantique. Le groupe s'intéresse depuis longtemps aux conséquences cosmologiques de cette approche. Récemment, nous avons poussé la démarche plus avant en considérant le rôle d'une correction d'holonomie généralisée. Il s'agit de sonder les effets phénoménologiques de la grandeur mathématique essentielle dans ce formalisme. L'étude a permis d'établir que les principaux résultats concernant le spectre cosmologique primordial sont fiables et ne dépendent pas de la forme précise des corrections quantiques.

Nous avons également considéré la théorie des champs de groupe, qui constitue un formalisme très adapté à la gravitation quantique, pour corriger quelques idées erronées concernant sa capacité à générer l'inflation primordiale. Des relations génériques entre les

paramètres libres ont été établies et le rôle précis joué par la « cellule quantique » élémentaire a été clarifié.

Indépendamment des effets quantiques, nous avons montré qu'un univers à courbure spatiale positive pouvait, dans certaines circonstances, présenter un passé non-singulier et conduire, lui aussi, à un phénomène de rebond cosmologique dans le strict cadre de la relativité générale. Nous avons étudié la cohérence de ce modèle – entièrement classique – et établi ce que pourraient être ses signatures observationnelles dans le rayonnement fossile. Un certain nombre de caractéristiques spécifiques ont été établies.

Enfin, le groupe a montré que des reliques de trous noirs pouvaient naturellement expliquer la matière noire dans le cadre des modèles cosmologiques holographiques et a établi des règles générales permettant d'étudier de façon systématique la compétition entre les effets quantiques et les effets classiques dans les systèmes binaires de trous noirs et l'univers primordial.

Une attention particulière a également été portée à l'évolution des trous noirs en présence de rayonnement thermique. L'existence de singularités a été montrée ainsi que l'articulation de leur apparition avec les détails de la dynamique cosmologique.

## Ondes gravitationnelles à hautes fréquences

La science des ondes gravitationnelles n'a eu de cesse de se développer dans les dernières décennies, menant en point d'orgue à leur première mise en évidence directe en 2015. Depuis lors, les efforts de recherche se sont notamment focalisés sur une meilleure caractérisation de ces ondes dans la gamme de fréquence correspondant aux premières observations, allant de quelques Hz à quelques dizaines de kHz, ainsi que sur l'exploration des plus basses fréquences, descendant jusqu'au nHz. La partie haute fréquence du spectre reste en revanche très largement inexplorée.

Le groupe de physique théorique du LPSC a tout d'abord travaillé sur la possibilité de rechercher des ondes gravitationnelles au GHz à l'aide de cavités résonnantes immergées dans de forts champs

magnétiques, comme celles utilisées dans la plateforme d'instrumentation GrAHal (pour Grenoble Axion Haloscope), développée conjointement entre l'institut Néel et le LNCMI. Le groupe a notamment établi et/ou revisité la sensibilité instrumentale attendue sur l'amplitude des ondes gravitationnelles dans le cas où celles-ci seraient générées par l'interaction gravitationnelle de trous noirs légers d'origine primordiale.

Le groupe a également calculé le fond stochastique d'ondes gravitationnelles associé au rayonnement synchrotron d'origine galactique et extra-galactique.

De manière plus générique nous avons également caractérisé les déformations subies par un signal d'ondes gravitationnelles si la source est en mouvement à grande vitesse (boost de Lorentz) par rapport à un observateur. Nous nous sommes également intéressés à la dynamique d'un système binaire de masses dans lequel des effets de variation de masse (via évaporation par exemple) entrent en compétition avec l'émission d'ondes gravitationnelles, système pour lequel des effets physiques subtils peuvent être attendus.

Enfin le groupe travaille également sur la génération contrôlée en laboratoire d'ondes gravitationnelles à très hautes fréquences induites par des faisceaux lasers portant un moment angulaire orbital, ainsi que sur les méthodes de détection associées. De nombreux ordres de grandeurs restent évidemment à combler

avant d'obtenir un système de générateur et détecteur d'ondes gravitationnelles, mais de nombreuses pistes sont encore à explorer.

## POUR EN SAVOIR+

### Thèses

- Implication des théories effectives des champs dans la phénoménologie de la physique des particules, Pham Ngoc Hoa Vuong, thèse encadrée par J. Quévillon, <https://theses.fr/2022GRALY052> (septembre 2022).
- Multi-scale theories beyond tree-level and the renormalisation group: Theory and applications, Lohan Sartore, thèse encadrée par I. Schienbein, [https://theses.hal.science/tel-04002574v1/file/SARTORE\\_2022\\_archivage.pdf](https://theses.hal.science/tel-04002574v1/file/SARTORE_2022_archivage.pdf) (novembre 2022).
- Beyond the Standard Model: phenomenology and LHC constraints of exotic dark matter, Gaël Alguero, thèse encadrée par G. Belanger et S. Kraml, Univ. Grenoble-Alpes, <https://theses.fr/2022GRALY074> (décembre 2022).
- Quelques Aspects de Théorie Effective des Champs et Anomalies Quantiques en Gavité », Rémy LARUE, thèse encadrée par C. Smith et J. Quévillon, <https://theses.fr/2024GRALY019> (juin 2024).

### Sites ressources

- <https://smodels.github.io>
- <https://openmapp.gitlab.io>
- <https://ncteq.hepforge.org>

# ÉQUIPE NEUTRONS ULTRAFROIDS (UCN)

L'équipe UCN développe un programme de recherche à l'interface de la physique des particules et de la cosmologie en utilisant comme sonde les neutrons ultra-froids. Ces neutrons de très faible vitesse ( $<10$  m/s) sont particulièrement sensibles à toutes les interactions élémentaires. Nous participons actuellement à un programme international visant à mesurer le moment dipolaire électrique du neutron auprès de la source d'UCN de l'Institut Paul Scherrer (PSI) en Suisse. Cette mesure permet de chercher une nouvelle source de violation de la symétrie CP, permettant d'expliquer l'asymétrie matière antimatière générée pendant la baryogénèse dans l'Univers primordial. Afin d'étudier différents effets systématiques de cette mesure, nous exploitons au LPSC un laboratoire de magnétométrie nucléaire. Nous participons également à des expériences ponctuelles à l'Institut Laue Langevin (ILL), voisin du LPSC.

## Membres permanents

Benoît Clément (responsable d'équipe), Konstantin Protassov, Guillaume Pignol (responsable d'équipe jusqu'à juin 2024), Dominique Rebreyend, Stéphanie Rocca.

## Membres non permanents

Thomas Bouillaud (doctorant), Katia Michielsen (doctorante), Pierre Navon (doctorant), Kseniia Svirina (post-doctorante).

## Personnels des services techniques

Romain Bourroux, Jean Foulard, Mile Kusulja, Johann Menu, Gilles Raffin, Samuel Roni, Sébastien Roudier, Francis Vezzu, Lucie Vivargent (Service Études et Réalisations Mécaniques), Jérôme Fulachier, Guillaume Dargaud (Service Informatique), Mohammed Chala, Julien Marpaud (Service Détecteurs et Instrumentation), Olivier Bourrion, Damien Tourres (Service Électronique).

## Le moment dipolaire électrique (EDM) du neutron et le projet n2EDM à PSI

L'EDM d'une particule de spin  $\frac{1}{2}$  quantifie le couplage du spin à un champ électrique appliqué, de la même façon que le moment magnétique  $\mu$  correspond au couplage entre le spin et le champ magnétique. L'existence d'un EDM non nul serait la signature d'une violation de la symétrie T, induite par une nouvelle interaction violant aussi la symétrie CP. Depuis le début de la recherche de l'EDM du neutron dans les années 1950, la précision a été améliorée par un facteur un million. C'est en particulier l'utilisation de neutrons ultra-froids, que l'on peut stocker pendant plusieurs minutes, qui a permis une avancée décisive de la précision. Malgré ces

progrès, toutes les mesures restent compatibles avec zéro. Depuis les années 2000, l'équipe UCN du LPSC participe à la collaboration internationale nEDM qui conduit un programme pour mesurer l'EDM du neutron auprès de la source de neutrons ultra froids du PSI en Suisse. La mesure consiste à exposer des neutrons ultra-froids à un fort champ électrique (en combinaison avec un faible champ magnétique), et mesurer l'effet de ces champs sur le spin du neutron. Le champ magnétique doit être contrôlé avec une précision extrême, ce qui nécessite des magnétomètres quantiques. La collaboration a exploité l'instrument nEDM jusqu'en 2017. L'analyse des données a conduit à la mesure la plus précise de l'EDM du neutron (toujours compatible avec zéro)  $d = (0 \pm 1.1) \times 10^{-26}$  e.cm. L'expérience de nouvelle génération, n2EDM, a été installée dans la période 2018-2023. Actuellement, l'équipe du LPSC participe activement à la mise en route de n2EDM et à l'exploitation des données de ce nouvel instrument qui va permettre à terme une mesure de l'EDM du neutron dix fois plus précise. Les services techniques du LPSC (SERM, SDI, Informatique) ont été impliqués dans plusieurs développements techniques pour ce projet.

## n2EDM : installation et mise en route de l'aiguillage des neutrons

Le « switch », ou aiguillage à neutron, est un élément central du dispositif de transport des UCN produits par la source de PSI. Il se situe entre l'aimant supraconducteur, qui permet de polariser les neutrons, et le blindage magnétique (figure 1). Il est constitué d'un ensemble de guides en verre droits de grandes dimensions ( $\varnothing_{\text{int}} = 130$  mm), reliés entre eux par des coudes métalliques et dont toutes les surfaces sont couvertes d'un dépôt nickel-molybdène. Ils sont disposés à l'intérieur d'un ensemble de chambres à vide reliées entre elles et formant un volume unique avec le reste de l'installation. Grâce à un moteur pas-à-pas, certains guides peuvent être déplacés rapidement et avec une grande précision (0.1 mm) afin d'assurer le transfert des neutrons de la source vers les chambres de précession durant le remplissage, puis des chambres vers les

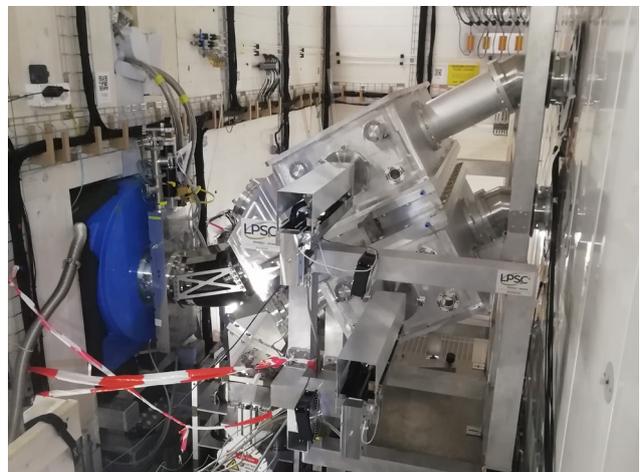


Figure 1 (Crédit : Collaboration nEDM/PSI).

détecteurs après une période de précession. Après un long et complexe travail de conception réalisé par Johann Menu (Service Études et Réalisations Mécaniques) compte tenu de nombreuses contraintes et de

multiples interfaces, le dispositif a été pré-monté et testé dans le hall Ariane du LPSC avant son transport et son installation au printemps 2023 sur le site de l'expérience. Le contrôle-commande a quant à lui été pris en charge par Julien Marpaud (Service Détecteurs et Instrumentation). Après quelques ajustements pour corriger des

imperfections dues en grande partie aux inévitables écarts entre le modèle théorique 3D et la réalité, le dispositif a été rapidement opérationnel et nous avons pu vérifier que toutes les performances étaient conformes au cahier des charges. Il fonctionne depuis lors avec une remarquable fiabilité.

## n2EDM : conception, installation et optimisation du co-magnétomètre mercure

Le co-magnétomètre mercure est le dispositif permettant de corriger en temps réel les fluctuations du champ magnétique et de maintenir ainsi la sensibilité statistique optimale de l'expérience. Il utilise la précession d'atomes de mercure-199, préalablement polarisés, dans le même volume que les neutrons. Nous avons repris le même principe de fonctionnement que celui mis en œuvre sur l'ancienne expérience, à savoir la préparation de la vapeur de mercure polarisée dans des cellules fixées au dos des électrodes et disposant d'une vanne pour les connecter au volume des chambres de précession, d'une fenêtre optique

pour illuminer la vapeur de mercure par un faisceau de lumière UV polarisée et d'un orifice connecté à un réservoir externe afin d'injecter la vapeur de mercure. L'analyse de la précession des atomes se fait quant à elle grâce à un faisceau de lumière UV traversant les chambres de précession perpendiculairement au champ magnétique vertical.

La conception de cet ensemble a été prise en charge par le bureau d'études du SERM (contributions de Johann Menu et Francis Vezzu). L'une des contraintes majeures a consisté à développer un dispositif compatible avec les limites drastiques sur les contaminations magnétiques, ce qui a imposé un choix très limité de matériaux. Cette phase de conception s'est aussi accompagnée d'un programme R&D dans notre laboratoire mercure L4M (Laboratoire pour la Mesure du Moment Magnétique du Mercure-199) où nous avons pu notamment tester différents revêtements ainsi que le fonctionnement de la vanne dans des conditions très proches de l'expérience.

Une première version de la cellule et de ses interfaces a été testée au LPSC à l'automne 2023 avant son installation à PSI début 2024 (figure 2). Les premiers essais ont permis de valider le fonctionnement global du système mais ils ont également mis en évidence un problème de frottement au niveau du passage étanche qui a fini par mener au blocage de la tige de commande. Un nouveau passage étanche utilisant des roulements à billes céramiques (développé par nos collègues de PSI) a pu être mis en place à l'automne 2024. Il donne pour l'instant satisfaction et permet de travailler sur l'optimisation des performances du co-magnétomètre dont les derniers résultats sont encourageants. L'objectif est de disposer d'un système pleinement opérationnel pour une première prise de données en 2025.



Figure 2 (Crédit : Collaboration nEDM/PSI).

Cette photo montre le cœur de l'expérience n2EDM avec les 2 chambres de précession empilées verticalement et séparées par l'électrode HT. Les neutrons sont amenés dans les chambres via les gros tubes horizontaux visibles en haut et en bas. On distingue également de part et d'autre des chambres les deux cellules (volume de 2 L) dans lesquelles les atomes de mercure sont stockés puis polarisés avant leur injection dans les chambres de précession. Un réservoir situé à l'extérieur de la chambre à vide contient une bille de mercure-199 métallique.

## n2EDM : cartographie magnétique robotisée

Les principales erreurs systématiques de l'expérience n2EDM ont pour origine les inhomogénéités du champ magnétique  $B_0$  dans lequel précèdent les neutrons. Pour garantir que ces erreurs sont sous contrôle et conformes à nos exigences, il est impératif de connaître la distribution spatiale du champ magnétique dans ses moindres détails, ce que ne permettent pas les magnétomètres en ligne mercure et césium. Pour ce faire, nous avons donc recours à un « mapper » (robot motorisé disposant d'une sonde magnétique 3D de type fluxgate) qui permet d'obtenir hors-ligne une cartographie 3D du champ vectoriel après avoir libéré l'espace au centre de la chambre à vide. La figure 3 montre un exemple d'une carte du champ vertical  $B_z$ . Ce dispositif, développé au LPSC sur la base du dispositif utilisé sur l'ancienne expérience (développé par le LPC Caen), a été installé en 2021 à PSI. Dans le cadre de la thèse de Thomas Bouillaud, soutenue fin 2024, cet instrument a été exploité pour caractériser dans un premier temps le champ magnétique résiduel résultant des caractéristiques du blindage magnétique plus d'éventuelles contaminations magnétiques de la chambre à vide. Cette étude a permis de mesurer dans le volume d'intérêt une uniformité dépassant largement le cahier des charges et sans équivalent. Thomas Bouillaud

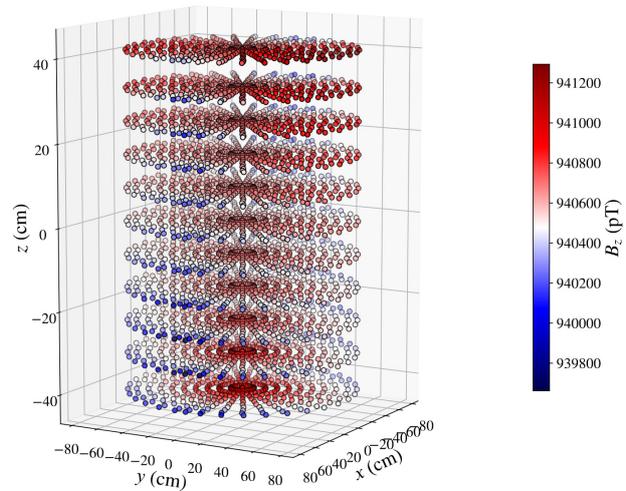


Figure 3 (Crédit : Thomas Bouillaud, thèse de doctorat, LPSC, UGA).

Exemple de carte mesurée à l'aide du « mapper ». Ce robot dispose d'un bras motorisé permettant de déplacer une sonde magnétique 3 axes dans un volume de diamètre 78 cm et d'une hauteur de 82 cm. Chaque point correspond à la projection verticale du champ magnétique.

a ensuite pu mesurer les caractéristiques du champ généré par l'ensemble des bobines de l'expérience n2EDM (bobine principale, 56 bobines d'optimisation et 7 bobines générant des gradients spécifiques). Ces études ont démontré que notre instrument est capable de générer un champ vertical de 1  $\mu\text{T}$  avec un écart-type relatif  $\sigma_B/B = 3 \times 10^{-5}$  sur le volume d'intérêt, soit un cylindre de 40 cm de rayon et d'une hauteur de 30 cm. Cette uniformité surpasse là-aussi le cahier des charges et nous permet de garantir que les erreurs systématiques liées au champ magnétique seront au niveau requis.

## Recherche d'oscillations $nn'$ à l'ILL

L'équipe exploite aussi les neutrons ultra-froids produits par l'Institut Laue Langevin de Grenoble, en particulier auprès de l'instrument PF2. Nous avons porté un programme de trois expériences cherchant une forme de matière noire bien particulière : la matière miroir. Dans des modèles de monde miroir (proposés pour rétablir la conservation de la parité dans les interactions

faibles) ou de dimensions supplémentaires multibranses (permettant notamment de justifier la faiblesse de la gravité relativement aux autres interactions), un objet neutre, tel que le neutron, est susceptible d'osciller vers un état caché. Si pour diverses raisons, il existe une différence d'énergie entre le neutron libre et son état caché, l'oscillation est impossible. En jouant sur le couplage entre spin et champ magnétique du neutron, on peut tenter de rétablir la dégénérescence. C'est sur ce principe qu'a été conçue l'expérience Elephant à l'ILL, où l'on recherche une variation du flux de neutron en fonction du champ magnétique que ces neutrons traversent. On fait traverser des neutrons ultra-froid dans un guide en les soumettant sur quelques mètres à un champ magnétique uniforme. Avec une première série de deux expériences en 2021-2022, nous avons exploré une

région de masse où le neutron miroir aurait une masse légèrement différente de celle du neutron, de 2 à 69 peV, sans observer d'oscillation plus rapide que 1s. Parallèlement, cette expérience a aussi servi à tester le détecteur UCN rapide développé par le LPC Caen pour n2EDM. Une seconde expérience utilisant un principe similaire, BabyElephant, visible sur la figure 4, a été réalisée en



Figure 4 (Crédit : Benoît Clément, LPSC, UGA).

L'expérience BabyElephant sur la ligne EDM de l'instrument PF2 à l'ILL en 2024. Au fond, la bobine solénoïdale d'1m20 de long générant un champ magnétique allant jusqu'à 25mT, traversée par un guide de neutrons de 5.5 m de long et 14 cm de diamètre. Ce guide est connecté au détecteur rapide d'UCN Gadget, visible au premier plan, utilisé dans n2EDM. Le guide et le détecteur sont identiques à l'installation de Elephant.

2024 pour monter à des champs magnétiques plus élevés. Elle utilise une bobine plus petite (don du LKB/ENS Paris) et une stratégie de scan optimisée pour couvrir une gamme de masse allant jusqu'à 1600 peV. Le résultat publié de l'expérience Elephant et la sensibilité attendue de BabyElephant sont présentés sur la figure 5.

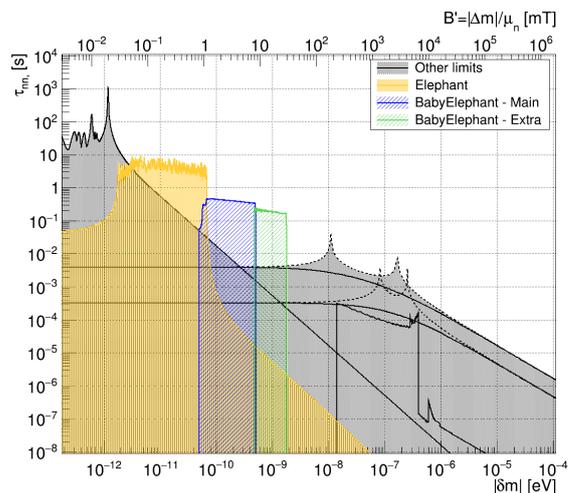


Figure 5 (Crédit : Benoît Clément, LPSC, UGA).

Exclusions à 95 % de niveau de confiance sur le couplage neutron-neutron miroir ( $\tau_{nn}$ ) en fonction de l'écart de masse entre les deux états. Le contour jaune est le résultat de l'expérience Elephant, les contours bleu et vert indiquent la sensibilité attendue pour BabyElephant sur deux phases distinctes de prise de données. Les contours noirs indiquent les contraintes apportées par d'autres expériences.

## POUR EN SAVOIR+

### Thèses et HDR

- Search for new physics beyond the standard model of particle physics, Stéphanie Roccia, Habilitation à Diriger les Recherches de l'Université Grenoble Alpes, mars 2024
- The internal magnetic field of the n2EDM experiment to probe CP symmetry : calculation of the magic field and control of non-uniformities, Thomas Bouillaud, thèse de l'Université Grenoble-Alpes, novembre 2022, <https://theses.hal.science/tel-04543374v1>

### Principales publications

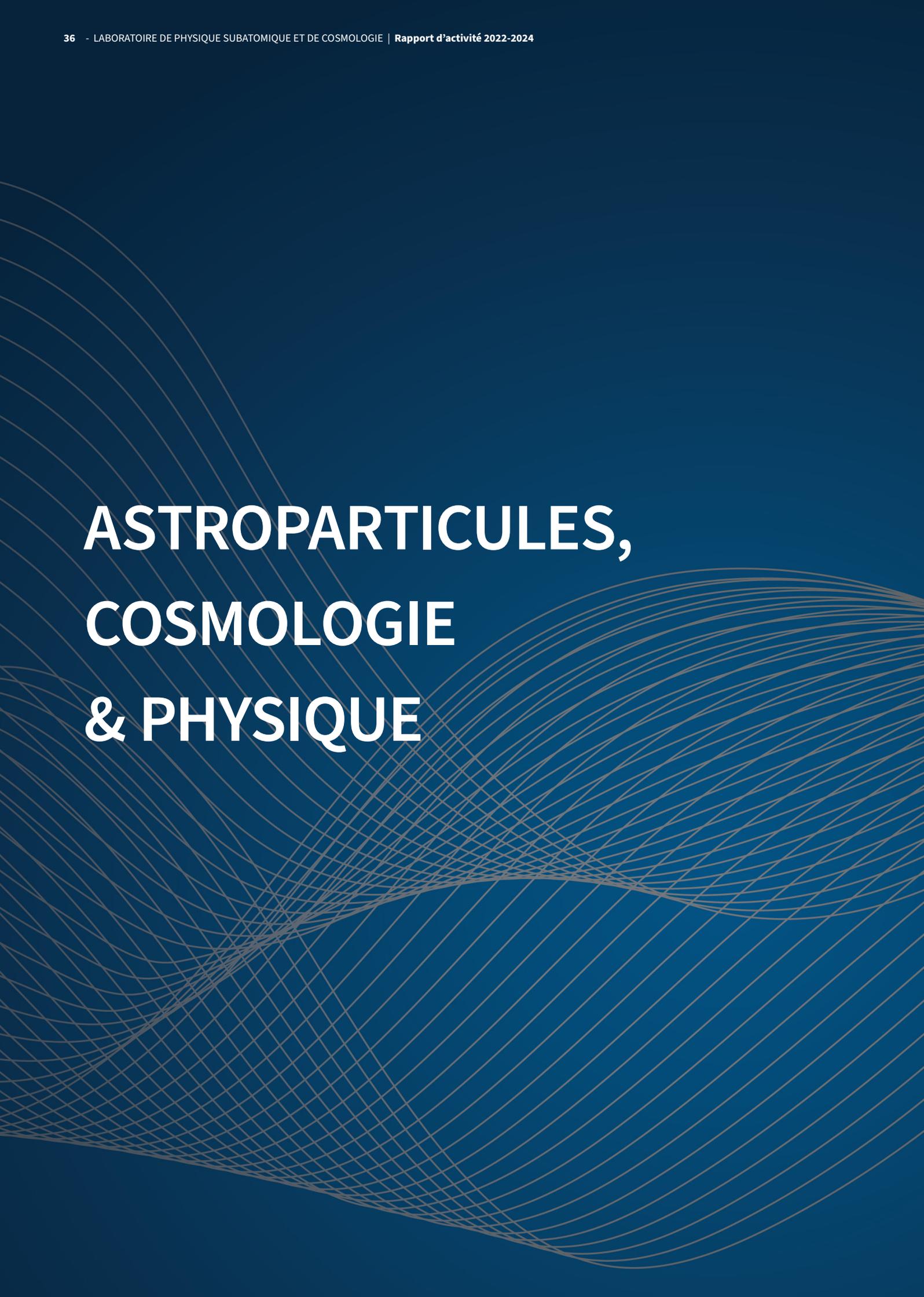
1. Achieving ultra-low and-uniform residual magnetic fields in a very large magnetically shielded room for fundamental physics experiments, N.J. Ayres et al., Eur. Phys. J. C 84, 1 (2024), [https://epjc.epj.org/articles/epjc/abs/2024/01/10052\\_2023\\_Article\\_12351/10052\\_2023\\_Article\\_12351.html](https://epjc.epj.org/articles/epjc/abs/2024/01/10052_2023_Article_12351/10052_2023_Article_12351.html)
2. Search for an interaction mediated by axion-like particles with ultracold neutrons at the PSI, N.J. Ayres et al., New Journal of Physics 25 (10), 103012 (2023), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/acfdc3>
3. Search for Neutron-to-Hidden-Neutron Oscillations in an Ultracold Neutron Beam, G. Ban et al., Phys. Rev. Lett. 131, 191801 (2023), <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.131.191801>
4. A large 'Active Magnetic Shield' for a high-precision experiment, C. Abel et al., Eur. Phys. J. C 83, 1061 (2023), [https://epjc.epj.org/articles/epjc/abs/2023/11/10052\\_2023\\_Article\\_12225/10052\\_2023\\_Article\\_12225.html](https://epjc.epj.org/articles/epjc/abs/2023/11/10052_2023_Article_12225/10052_2023_Article_12225.html)
5. Search for flavour-changing neutral tqH interactions with  $H \rightarrow \gamma\gamma$  in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV using the ATLAS detector, la collaboration ATLAS, JHEP12(2023)195, <https://inspirehep.net/literature/2702149>
6. The very large n2EDM magnetically shielded room with an exceptional performance for fundamental physics measurements, N.J. Ayres et al., Rev. Sc. Instr. 93, 095105 (2022), <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article/93/9/095105/2849432/>
7. Determination of diffusion coefficients of mercury atoms in various gases from longitudinal spin relaxation in magnetic gradients, B. Clément et al., Phys. Rev. A 106, 062815 (2022), <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.106.062815>
8. Spatial resolution determination of a position sensitive ultra-cold neutron detector, B. Clément et al., Nucl. Inst. Meth. A 1040, 167212 (2022), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900222005678>
9. Mapping of the magnetic field to correct systematic effects in a neutron electric dipole moment experiment, C. Abel et al., Phys. Rev. A 106, 032808 (2022), <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRevA.106.032808>

### Ressource Web

- <https://www.psi.ch/en/nedm>



# ASTROPARTICULES, COSMOLOGIE & PHYSIQUE



Les équipes de recherche de l'axe «astroparticules, cosmologie et neutrinos» s'intéressent aux constituants élémentaires de l'Univers, ainsi qu'à sa structure et à son évolution depuis le Big Bang. Pour cela, ces équipes développent des expériences de détection, en laboratoire ou en orbite, et des observatoires astronomiques, afin de recueillir des données qui sont ensuite analysées et interprétées.

Les rayons cosmiques sont des particules énergétiques détectées sur Terre, dont on comprend mal l'origine, galactique ou extragalactique, et la propagation dans le milieu interstellaire. Les expériences ont mis en évidence des rayonnements de haute et ultra haute énergie qui permettent d'éclairer de nombreuses questions en physique des particules et en astrophysique. L'équipe Auger participe activement au fonctionnement et à l'analyse des gerbes de particules détectées par l'Observatoire Pierre Auger, couvrant 3000 km<sup>2</sup> en Argentine, tandis que l'équipe DARK participe à l'analyse et l'interprétation des données d'AMS-02 (expérience sur la station spatiale internationale), notamment pour éclairer le lien entre rayons cosmiques et matière noire. Les particules hypothétiques de matière noire présentes dans notre Galaxie pourraient également interagir faiblement avec des noyaux atomiques, permettant une détection directe. L'équipe Matière noire participe au développement d'un détecteur directionnel permettant d'isoler le recul nucléaire provoqué par la matière noire galactique de celui généré par les neutrons et neutrinos qui traversent le détecteur.

Les observations cosmologiques des trois dernières décennies ont renforcé l'hypothèse de l'existence de matière et d'énergie dite noires, car n'interagissant que très peu avec le reste de la matière. La matière noire constituerait 80 % de la matière dans l'Univers et façonnerait sa structure aux échelles cosmiques, alors que l'énergie noire est invoquée pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers. Les amas de galaxies représentent les objets gravitationnellement liés les plus massifs

de l'Univers, et constituent un témoin de la formation des structures cosmiques par gravité dans un Univers en expansion. Dans le domaine millimétrique, ils sont détectés par les traces qu'ils laissent dans le fond diffus cosmologique. L'équipe Cosmo-ML est impliquée dans la conception, l'instrumentation et l'analyse des expériences NIKA2 et CONCERTO à haute résolution. Elle prépare également la prochaine génération d'expériences de mesure du fond diffus cosmologique, telles LiteBIRD et CMB-S4. Dans le domaine optique, les amas sont révélés par leur contenu en galaxies, tandis que l'effet de lentille gravitationnelle offre une méthode privilégiée pour reconstruire leur masse. Ces axes sont explorés par l'équipe Cosmo-ML, avec le satellite Euclid, et par l'équipe DARK, notamment avec l'observatoire Vera C. Rubin, dont la construction s'achève au Chili. Ces deux observatoires combineront plusieurs sondes cosmologiques pour mesurer précisément l'expansion de l'Univers.

Un temps envisagés comme candidats pour expliquer la matière noire, les neutrinos demeurent des particules mal connues. Leurs propriétés pourraient révéler une physique au-delà du modèle standard de la physique des particules, et affecter leur rôle en astrophysique et en cosmologie. L'équipe Neutrino est donc impliquée dans des expériences visant à mesurer précisément les propriétés fondamentales des neutrinos, telles que l'existence d'un hypothétique état stérile du neutrino avec l'expérience STEREO auprès du réacteur de l'Institut Laue Langevin (ILL), la diffusion cohérente sur les noyaux avec l'expérience RICOCHET à l'ILL et l'ensemble des paramètres régissant les oscillations à longue distance (violation de CP, hiérarchie de masse, paramètres de mélange) avec l'expérience DUNE aux États-Unis.

# ÉQUIPE AUGER

La thématique de recherche de l'équipe Auger porte sur les rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE). Pour étudier ces astroparticules, il faut recueillir une statistique de données importante, avec des mesures précises. L'Observatoire Pierre Auger, en Argentine, conçu pour mesurer les RCUHE via les grandes gerbes atmosphériques, répond à ces critères grâce à une superficie de 3000 km<sup>2</sup> instrumentée par 1660 détecteurs composant le détecteur de surface (SD) et par 27 télescopes de fluorescence (FD). Fonctionnant depuis 20 ans, l'Observatoire est devenu l'expérience phare dans ce domaine. L'équipe « Auger », membre de la collaboration Pierre Auger, est impliquée dans le fonctionnement et l'amélioration de l'Observatoire et dans l'analyse de ses données. Elle a parallèlement contribué à des études phénoménologiques portant sur les RCUHE.

## **Membre permanent**

Corinne Bérat (responsable).

## **Membres non permanents**

Carla Bleve (post-doctorante), François Montanet (émerite), Zoé Torrès (doctorante).

## **Personnel des services techniques**

Patrick Stassi (responsable technique, Service Détecteurs et Instrumentation).

## Fonctionnement de l'Observatoire Pierre Auger et projet AugerPrime

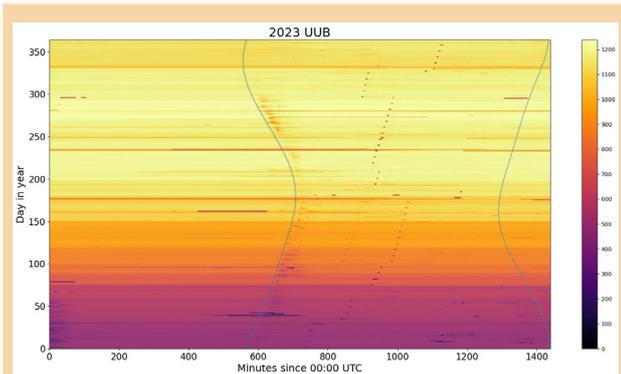


Figure 1 (Crédit : Corinne Bérat, LPSC, CNRS).

Evolution, pour l'année 2023, du nombre d'hexagones,  $N_{hex}$  (1 hexagone est formé par 7 détecteurs), donnée utilisée pour calculer l'exposition du réseau de surface. Ne sont considérés que les détecteurs avec la nouvelle électronique embarquée.  $N_{hex}$  (échelle verticale) est calculé chaque minute (abscisse) pour chaque jour de l'année (ordonnée). Il augmente au fil du déploiement de la nouvelle électronique. Ce graphe met en évidence des coïncidences temporelles d'évolution de  $N_{hex}$ . Par exemple, une diminution de  $N_{hex}$  est corrélée au lever du soleil (lignes bleues : lever/coucher du soleil). L'origine de ce comportement a été identifiée.

Une grande partie des activités de l'équipe concerne le fonctionnement du SD. Une des membres a eu la fonction de «SD detector coordinator », et a continué de s'impliquer dans le contrôle en ligne et le suivi des performances du SD. L'équipe participe au projet AugerPrime conçu pour accroître les performances de l'Observatoire dans l'identification des particules cosmiques primaires grâce à l'ajout de scintillateurs sur chaque détecteur Cherenkov à eau du SD. L'équipe a assuré le suivi de la production, la validation, et le déploiement sur site des nouvelles cartes électroniques embarquées, et a participé à la phase de leur commissioning, en travaillant à la détection, à la résolution des problèmes et à la mise à jour nécessaire du suivi en ligne. Des outils ont été développés pour quantifier les évolutions de l'exposition du SD (figure 1). L'équipe a contribué à la préparation de la revue du projet AugerPrime (novembre 2023), et a pris part à la rédaction de deux articles concernant le projet.

## Étude des photons d'ultra haute énergie (UHE)

La recherche de photons UHE constitue un moyen pour discriminer entre les différents scénarios expliquant l'origine des RCUHE [4]. Si l'observation de photons au-delà de  $10^{17}$  eV serait une avancée majeure, la non-observation de sources ponctuelles et de flux diffus de photons et de neutrinos par Auger permet de contraindre très efficacement les modèles dit « top-down » (production des RCUHE par désintégration de particules supermassives) et d'explorer les scénarios astrophysiques.

Pour identifier des photons dans le flux des RCUHE,

on exploite les différences de développement des gerbes induites par ces photons et celles induites par les hadrons. Un travail de thèse s'est déroulé de 2020 à 2023, pour développer une recherche performante de photons UHE dans les données Auger. L'originalité de ce travail réside dans l'utilisation du principe d'universalité des gerbes atmosphériques dans la procédure de reconstruction. Suivant ce principe, les propriétés moyennes d'une gerbe atmosphérique sont décrites avec un nombre réduit de paramètres macroscopiques. Des modèles prédisent la forme et l'intensité des signaux reçus par les détecteurs au sol, et les caractéristiques de la particule cosmique primaire sont alors reconstruites en comparant la prédiction aux signaux mesurés. Pour la première fois, une méthode de reconstruction utilisant le principe d'universalité a été développée pour la recherche de photons, uniquement à partir du SD. Ainsi, le maximum de développement des gerbes ( $X_{max}$ ), une observable permettant de séparer les gerbes initiées

par des photons de celles issues de hadrons, mais qui n'est pas directement accessible avec le SD, est reconstruite grâce à la méthode développée dans la thèse.  $X_{\max}$  est combiné à deux autres variables caractérisant la gerbe dans une analyse discriminante. L'approche suivie ouvre la voie à une amélioration de la sensibilité dans la recherche de photons UHE. En

effet, l'analyse originale ainsi conçue présente une efficacité supérieure aux analyses précédentes. De plus, ce travail constitue une base solide pour des développements futurs en particulier dans le cadre du projet Auger Prime, avec des possibilités d'améliorations de la sensibilité.

## Production de photons par les RCUHE dans la galaxie

Suite à un travail évaluant le flux de photons UHE produits par l'interaction des RCUHE avec le gaz contenu dans la galaxie, le groupe a également évalué le flux de neutrinos UHE. Les données considérées sont les flux de différents noyaux mesurés par Auger, la distribution de gaz (H, He) dans la galaxie, les sections

efficaces des interactions entre RCUHE et noyaux cibles, et le taux de production de neutrinos dans ces interactions, ces deux derniers paramètres étant déterminés grâce à des simulations d'interactions de 1015 à 1020 eV. L'étude a permis de quantifier le flux de neutrinos résultant de ces interactions, et les résultats de l'étude ont été publiés [2] (voir figure 2). Lors de l'accueil d'un visiteur argentin, un travail pour étendre le calcul du flux attendu de photons produits à plus basse énergie dans les interactions a été entrepris, et les différents codes permettant d'évaluer le flux ont été transmis pour que le travail puisse se poursuivre après la fermeture (en 2025) de l'équipe Auger du LPSC.

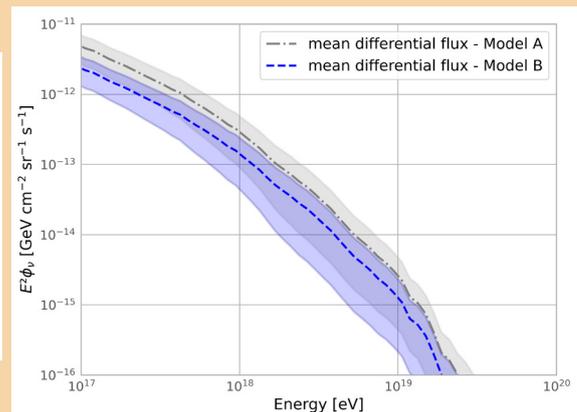
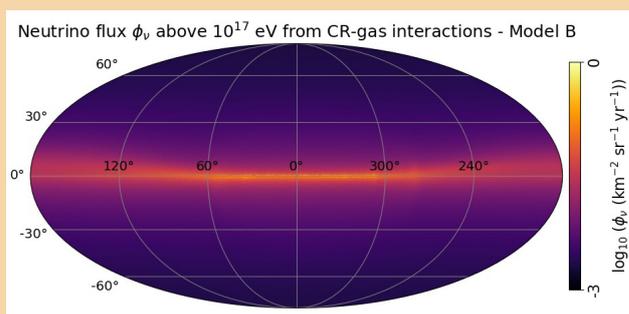


Figure 2 (Crédit : Figures extraites de [2]).

Flux attendu de neutrinos produits par les interactions des RCUHE avec la matière (gaz) dans la Voie Lactée. Gauche : Flux intégré au-dessus de  $10^{17}$  eV, en fonction des coordonnées galactiques (projection de Hammer) pour un modèle de distribution du gaz dans la galaxie. Droite : flux différentiel en fonction de l'énergie pour deux modèles de distribution.

# Projet MICRO

Une partie du groupe Auger a participé au projet MICRO (financé par l'ANR) dont l'objectif est d'apporter une contribution originale pour répondre à la question de l'identification des sources de RCUHE. On étudie comment les signatures de type transitoire (sursauts gamma, éruptions d'AGN) s'accordent avec les données mesurées sur les RCUHE, si les observables actuelles peuvent contraindre la distribution spatiale des sources et si les neutrinos et gamma UHE

proviennent des mêmes sources transitoires. Au sein du projet, un code python a été développé pour l'ajustement combiné entre spectre et composition du flux des RCUHE tels que prédits par les modèles (injection par des sources + propagation) avec spectre et composition mesurés. Les informations sur la composition ( $\langle X_{\max} \rangle$ ,  $s(X_{\max})$ ) proviennent des mesures faites par le FD. La contribution de l'équipe Auger a porté sur l'utilisation des mesures de  $X_{\max}$  reconstruites à partir des données du SDI, et l'impact sur les ajustements des paramètres du modèle lorsqu'on utilise ces mesures par rapport à celles fournies plus directement par le FD.

## POUR EN SAVOIR+

### Thèse

- Identification of UHE Photons for Multi-Messengers Astronomy with Universality at the Pierre Auger Observatory, Zoé Torres, Thèse de doctorat de l'Université Grenoble Alpes, École doctorale de Physique, n° 47 Spécialité de doctorat : Physique Subatomique et Astroparticules, Octobre 2023. <https://theses.hal.science/tel-04512576>

### Principales publications

1. AugerPrime surface detector electronics, The Pierre Auger Collaboration, JINST 18 (2023) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/18/10/P10016>
2. Floor of cosmogenic neutrino fluxes above  $10^{17}$  eV, Corinne Bérat, Antonio Condorelli, Olivier Deligny, François Montanet, and Zoé Torrès; ApJ 966, 186 (2024) <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad372a>
3. Constraints on metastable superheavy dark matter coupled to sterile neutrinos with the Pierre Auger Observatory, The Pierre Auger Collaboration, Phys. Rev. D 109, L081101 (2024) <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.109.L081101>
4. Search for photons above 1019 eV with the surface detector of the Pierre Auger Observatory, The Pierre Auger Collaboration, JCAP 05 (2023) <https://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2023/05/021>

### Ressources Web

- <https://www.auger.org/>
- <https://opendata.auger.org/>

# ÉQUIPE COSMOLOGIE MULTI-LONGUEURS D'ONDE

L'équipe Cosmologie Multi-Longueur d'onde (COSMO-ML) est engagée de longue date sur la thématique de la cosmologie observationnelle et instrumentale. Elle s'est toujours impliquée depuis la construction des instruments jusqu'à l'exploitation des données pour la cosmologie. L'activité porte d'une part sur l'instrumentation, en collaboration étroite avec les services techniques du LPSC, notamment la conception et l'électronique de détecteurs et caméras pour la cosmologie. L'analyse de données constitue le deuxième volet, avec le développement de pipelines d'analyse, l'étalonnage, le commissioning et la caractérisation des performances. Le troisième porte sur l'exploitation à plus haut niveau des données pour l'obtention des résultats cosmologiques. L'équipe a fusionné avec l'équipe DARK pour former l'équipe cosmologie observationnelle en juin 2024.

## Membres permanents

Andrea Catalano, Frédéric Mayet (responsable équipe depuis le 1/04/2022), Juan Francisco Macías-Pérez (responsable équipe jusqu'au 1/04/2022), Anna Niemiec, Laurence Perotto.

## Membres non permanents

Damien Cherouvrier (doctorant), Mateo Fernandez-Torreiro (post-doctorant), Coentin Hanser (doctorant), Louis Mirouze (doctorant), Alice Moyer-Anin (doctorante), Miren Muñoz-Echeverria (doctorante), Alessia Ritacco (CPJ CNRS), Sofia Savorgnano (doctorante), Aparajita Sen (post-doctorante).

## Personnels des services techniques

Julien Bounmy, Olivier Bourrion, Oliver Choulet, Christophe Hoarau, Eric Lagorio, Nicolas Ponchant, Fatah Rarbi, Damien Tourres, Christophe Vescovi, Jonathan Waquet (Service Électronique), Julien Marpaud, Marc Marton, Patrick Stassi (Service Détecteurs et Instrumentation), Nora Achbak, Gael Alguero, Jérôme Fulachier, Fabian Lambert, Jérôme Odier (Service Informatique), Romain Bourroux, Mile Kusulja, Johann Menu, Samuel Roni, Sébastien Roudier, Francis Vezzu (Service Etudes et Réalisations Mécaniques).

## Introduction

L'activité de l'équipe Cosmologie Multi-Longueur d'onde (COSMO-ML) se décline en trois volets. Le premier porte sur l'instrumentation, en collaboration étroite avec les services techniques du LPSC, notamment la conception et l'électronique de détecteurs et caméras pour la cosmologie. L'équipe a acquis une expertise dans le développement d'instruments utilisant la technologie KID (Kinetic Inductance Detectors), dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique KIDs. L'analyse de données constitue

le deuxième volet, avec le développement de pipelines d'analyse, l'étalonnage, le commissioning et la caractérisation des performances. L'analyse des données brutes constitue en effet un point clef pour la maîtrise des effets systématiques. Finalement, le troisième volet porte sur l'exploitation des données de plus haut niveau pour l'obtention des résultats cosmologiques. Au cours des années, l'équipe a contribué de manière significative aux expériences mesurant le fond diffus cosmologique (CMB) en température et en polarisation, la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB et la mesure de l'effet Sunyaev-Zeldovich (SZ), ainsi que la cosmologie avec des amas de galaxies.

## NIKA2

NIKA2 est une caméra utilisant la technologie KIDs pour des observations dans le domaine millimétrique avec le télescope de 30 m de l'institut de radioastronomie millimétrique (IRAM). Dotée de trois matrices de milliers de détecteurs, elle permet des observations en intensité à 1,2 et 2 mm et en polarisation à 1 mm. Conçue par la collaboration NIKA2, elle intègre des contributions majeures du LPSC, qui a notamment pris en charge l'électronique et le commissioning.

Le LPSC pilote le grand programme d'observation Sunyaev Zel'dovich (SZ) dédié à la cosmologie avec les amas de galaxies. Ce programme cible 38 amas de galaxies avec des redshifts de 0,5 à 0,9, sélectionnés dans les catalogues des télescopes Planck et ACT. L'objectif prioritaire est la mesure du profil de pression universel et de la relation d'échelle entre masse et signal SZ, des outils essentiels pour la cosmologie avec les amas.

Les observations SZ, entamées en 2017, ont été finalisées en janvier 2023. Dans le cadre de la thèse de C. Hanser, une analyse standardisée des amas a été réalisée. Les cartes finales ont été produites, démontrant une excellente sensibilité au signal SZ. Les profils de pression du milieu intra-amas ont été extraits en utilisant une chaîne d'analyse robuste basée sur le code PANCO2 [1]. L'analyse thermodynamique complète, combinant données SZ de NIKA2 et X de XMM-Newton, a permis d'estimer les masses hydrostatiques des amas. Dans [2], nous avons évalué le biais hydrostatique par comparaison avec des données de lentillage gravitationnel. Avec les résultats de

l'échantillon, nous avons estimé le profil de pression universel et la relation d'échelle, cette dernière étant le sujet principal de la thèse (en cours) d'A. Moyer-Anin. Nous avons exploré l'implication sur les paramètres cosmologiques avec la carte de Compton et le comptage des amas de Planck.

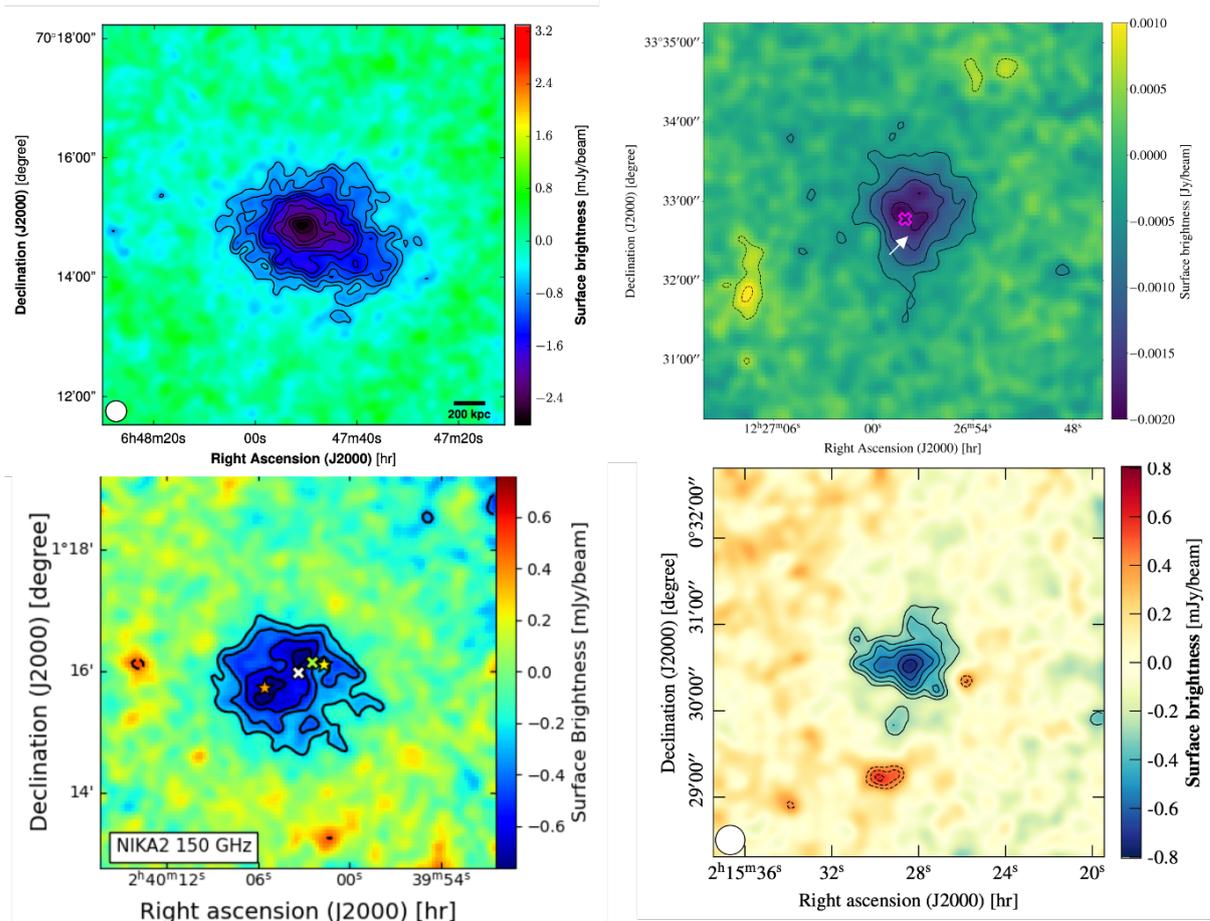


Figure 1 (Crédit : CNRS/LPSC).

Cartes d'amas observés avec NIKA2 à 150 GHz : PSZ2G144, un amas massif à redshift intermédiaire, PSZ2G160, un amas massif à haut redshift, ACTJ0240, un amas peu massif à redshift intermédiaire et ACTJ0215, un amas peu massif à haut redshift.

Le LPSC a également contribué à la conception et au déploiement du système de polarisation de NIKA2, utilisé pour étalonner les expériences futures visant la mesure des modes B primordiaux du CMB. Enfin, l'équipe a été impliquée dans la détection d'amas

dans les champs profonds observés par NIKA2, dans le cadre de la thèse de D. Cherouvrier, et en polarisation dans le cadre de celle de S. Savorgnano. Les premiers résultats sont prometteurs et les publications sont en préparation.

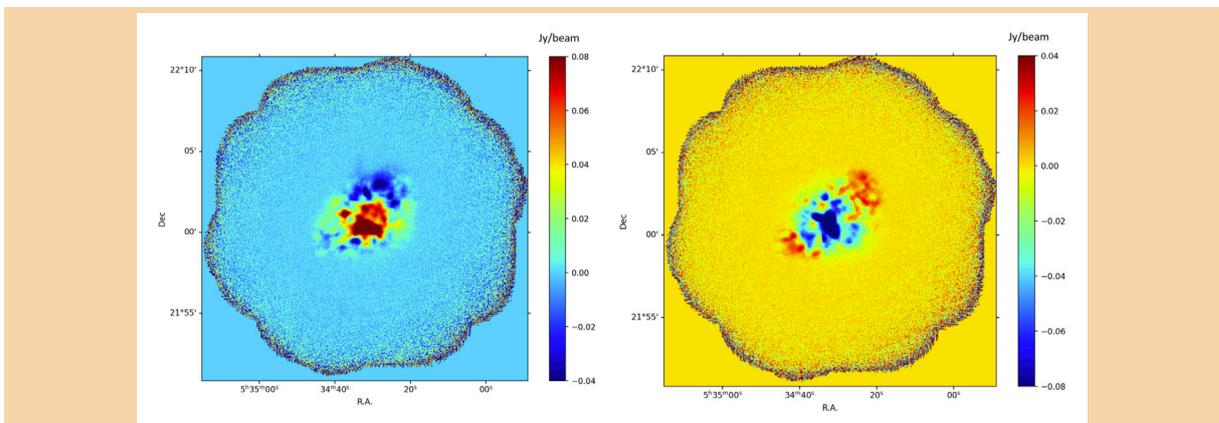


Figure 2 (Crédit : CNRS/LPSC).

Mesure de la polarisation de la nébuleuse du Crabe à 260 GHz par la caméra NIKA2. De droite à gauche nous montrons les cartes des paramètres de Stokes Q et U respectivement. L'équipe COSMO-ML a été en charge de la fabrication et commissioning du système de mesure de la polarisation avec NIKA2. L'équipe COSMO-ML travaille sur une mesure précise de l'angle de polarisation du Crabe afin de pouvoir calibrer en polarisation les instruments CMB dédiés à la quête des modes B primordiaux comme par exemple le Simons Observatory, CMB-S4 et LiteBIRD.

## Concerto

Le LPSC, au sein du GIS KIDS, a été moteur dans le développement de spectro-imageurs millimétriques au sol à base de détecteurs KIDS. CONCERTO (CARBON CII line in post-rEionisation and ReionisationTiOn), financé par une ERC senior, a été exploité de 2021 à 2023 au télescope APEX situé à 5000 m d'altitude au Chili. CONCERTO utilise 2 matrices de 2172 détecteurs chacune, correspondant à un plan focal de 18,6 minutes d'arc de diamètre, observant

entre 130 et 310 GHz, et avec une résolution spectrale maximale de 1,8 GHz. Le LPSC a pris en charge la conception optique ainsi que la conception et fabrication de l'électronique et du système d'acquisition. Nous avons participé aux campagnes d'observations et de maintenance de l'instrument. Celles-ci ont permis d'assurer 1350 heures d'observation du champ COSMOS dans le cadre du grand programme pour le line intensity mapping. Le LPSC a été moteur et a pris en charge des observations du spectre SZ pour environ 350 heures. Actuellement, nous sommes fortement impliqués dans le développement du pipeline d'analyse des données en spectroscopie et dans l'exploitation des données SZ.

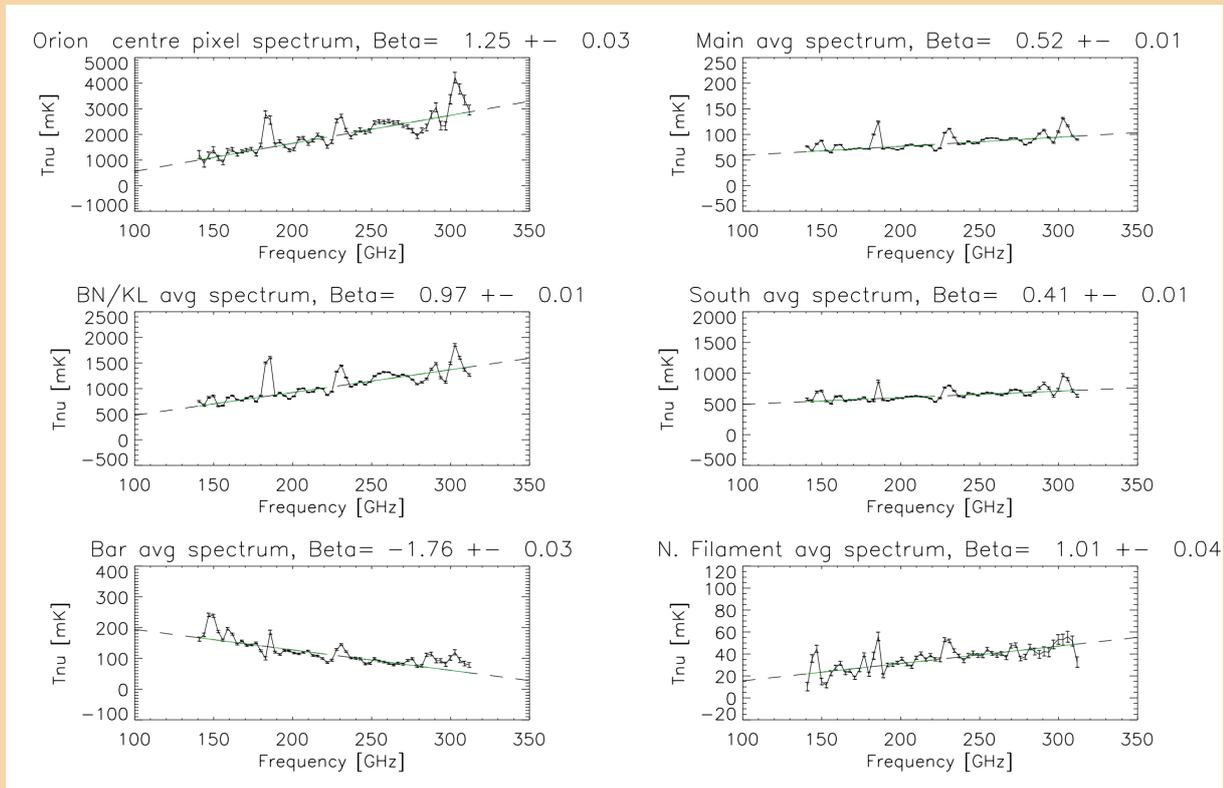


Figure 3 (Crédit : CNRS/LPSC).

Sélection de spectres électromagnétiques de la nébuleuse d'Orion obtenus par CONCERTO par « intensity mapping » dans des régions de choix. Nous observons l'émission du continuum entre 140 et 320 GHz avec grande diversité de processus physiques incluant l'émission thermique de la poussière et du Bremsstrahlung. Dans certaines régions, on observe également des raies à 183 et 240 GHz correspondant à la vapeur d'eau et le CO, qui ont ainsi pu être cartographiées avec CONCERTO. L'équipe COSMO-ML a été en charge du pipeline d'analyse.

# Euclid

Euclid est une mission spatiale de l'ESA, lancée au point L2 de Lagrange en Juillet 2023, pour la cosmologie dans les domaines visible et infra-rouge via l'effet de lentille gravitationnel faible, le clustering de galaxies et les amas de galaxies. Avec deux instruments à l'état de l'art, l'imageur visible VIS et le spectromètre slitless infrarouge NISP, associés à une très grande couverture (15000 deg<sup>2</sup>) du ciel, Euclid représente une expérience majeure de cosmologie pour les décennies à venir. L'équipe COSMO-ML s'est fortement impliquée dans la caractérisation du NISP avec la prise en charge des tests de compatibilité électromagnétique des détecteurs ainsi que des sources de calibration réalisés chez Airbus Space pour lesquelles un cryostat de test a été construit. Nous sommes actuellement fortement impliqués dans l'analyse des données d'Euclid au sein du Science Ground Segment. Dans ce cadre

nous avons la responsabilité de l'analyse des données internes et la construction des masques des propriétés d'observation, de l'instrument et brillance du ciel, qui ont été rendue publiques dans le cadre de la livraison publique de données Q1. Les variations spatiales de ses derniers peuvent donner lieu à des effets systématiques pour la détection de galaxies. Nous avons mis en place des algorithmes d'apprentissage automatique afin de corriger la fonction de corrélation 3x2-pt et la fonction de détection des amas de galaxies de ces effets. Nous participons également au groupe de travail sur l'effet de lentille gravitationnelle afin de caractériser et corriger ces effets systématiques au niveau des paramètres cosmologiques. Nous sommes de plus fortement impliqués dans le pipeline de détection des amas de galaxies. Nous travaillons notamment à la préparation des données ainsi qu'à la validation et l'exploitation du catalogue d'amas de galaxies, ceci afin d'étudier de possibles effets systématiques sur l'estimation des propriétés des amas ainsi que sur les paramètres cosmologiques.

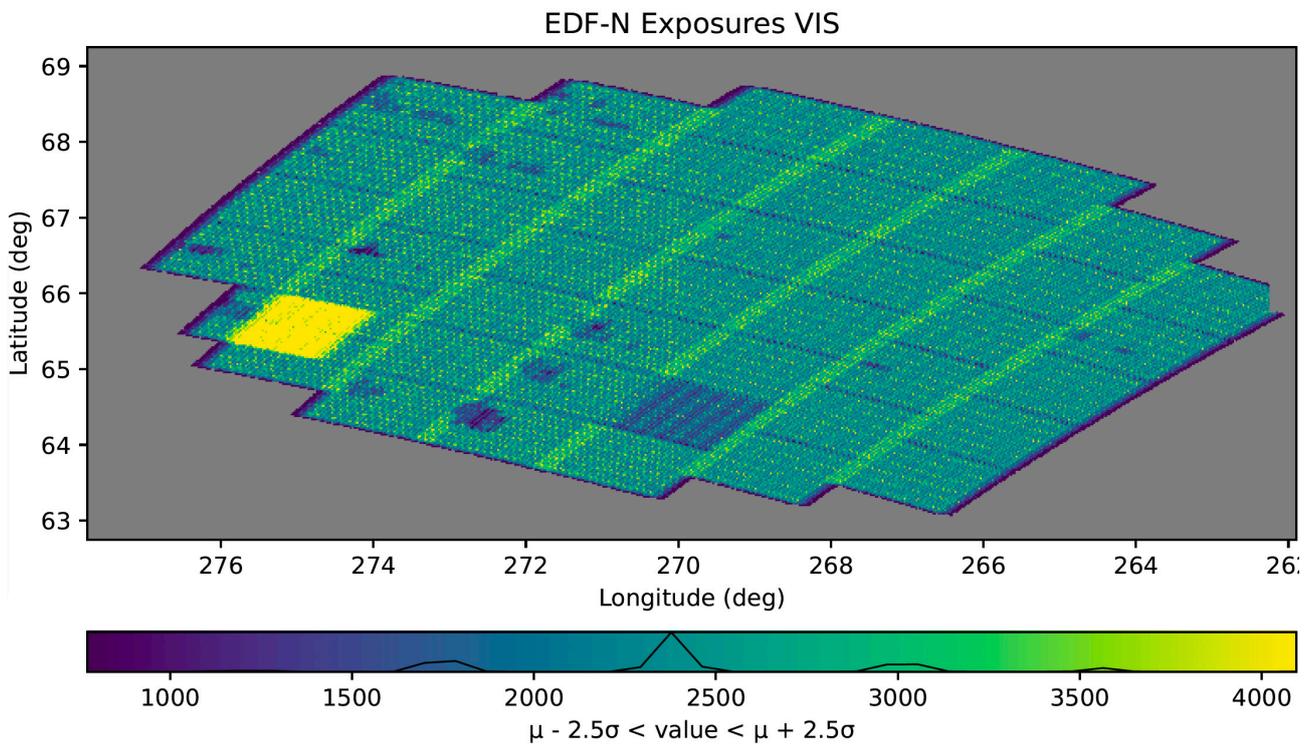


Figure 4 (Crédit : CNRS/LPSC).

Masque du temps d'exposition de l'instrument VIS d'Euclid qui fera partie du Euclid Quick Release (Q1) attendu pour fin 2025. Ce masque fait partie de la centaine de masques produits pour l'Euclid Ground Segment (SGS) sous la responsabilité du LPSC.

## Simons Observatory

L'expérience Simons Observatory (SO), qui vise la mesure des anisotropies en température et polarisation du CMB avec une précision inégalée, est en cours d'installation dans le désert d'Atacama au Chili. Avec six instruments de type SAT (small aperture telescope) et un LAT (large aperture telescope) SO permettra à la fois l'étude des modes B primordiaux en polarisation du CMB et la cartographie de la matière dans l'Univers grâce à l'effet de lentille gravitationnelle et à l'effet SZ. Dans le cadre de l'appel à projet CNRS RI2 (Recherche à risque et à impact), nous proposons la construction et l'équipement d'un SAT, Kairos,

avec un nouvel instrument basé sur la technologie KID développée par le GIS-KID à Grenoble. Visant un instrument observant à haute fréquence (> 200 GHz) et grâce à la technologie KID, nous proposons une contribution significative à SO de part : 1) une meilleure couverture du plan focal, 2) des mesures redondantes pour la soustraction de la contamination atmosphérique et 3) un bras de levier en fréquence plus important pour réduire la contribution de la poussière galactique aux modes B primordiaux du CMB. Dans l'hypothèse d'un financement en 2025, il est réaliste d'envisager une installation dans la deuxième phase de l'exploitation (Advanced SO). Nous souhaitons également nous investir sur les analyses cosmologiques dans le cadre de l'effet de lentille gravitationnelle et des amas de galaxies.

## CMB-S4

CMB-S4 est la prochaine génération d'expérience CMB au sol, qui, avec 0.5 million de détecteurs couvrant une gamme de fréquence de 20 à 350 GHz, mesurera la température et la polarisation du CMB avec une précision jamais atteinte. Son programme scientifique ambitieux couvre la recherche de mode B primordiaux signant l'inflation, la recherche de nouvelles particules reliques, la détermination de la hiérarchie de masses des neutrinos, la compréhension de la formation des structures ou encore l'étude de

l'univers transitoire.

L'expérience se composera d'une série de SAT de 0,6 m de diamètre et d'une série de LAT de 6 m situées dans le désert de l'Atacama proche du site de SO. La construction devrait commencer avant la fin de la décennie, pour une mise en service après la fin des observations de SO, et une durée d'observation de 10 ans.

L'équipe et les services techniques sont déjà engagés dans le développement de l'électronique de lecture à température ambiante et dans le Data Management du projet. Nous visons une contribution forte à la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle et à la cosmologie avec les effets SZ thermique et cinétique.

## LiteBird et l'ERC RADIOFOREGROUNDS+

LiteBird est un projet d'expérience satellite des agences spatiales japonaises (JAXA), américaines (NASA) et européenne (ESA) dont le lancement est prévu en 2033. Elle vise la mesure des anisotropies du CMB en polarisation et notamment des modes B primordiaux. LiteBIRD a 14 bandes en fréquence entre 34 et 448 GHz et une sensibilité exquise, avec 3 instruments. Ainsi, LiteBIRD ambitionne de réaliser la mesure la plus précise de l'énergie de l'inflation ouvrant la porte vers la physique de l'Univers primordial. L'équipe a

pris en charge la caractérisation au sol de la mesure de la polarisation. Nous sommes également impliqués dans la préparation de l'analyse des données et notamment en ce qui concerne la calibration en vol et de la correction des effets systématiques. Par ailleurs, nous participons aux études de physique comme la mesure de l'effet SZ et des émissions d'avant-plan en polarisation.

L'ERC Radioforegrounds+ est un projet HORIZON-CL4-2023-SPACE-01, dont l'équipe est co-PI. Il vise la caractérisation précise des émissions en polarisation de la poussière et le synchrotron galactique afin de diminuer leur contamination dans la mesure des anisotropies en polarisation du CMB dont les modes B primordiaux, ce qui lie ce projet naturellement à LiteBird.

## POUR EN SAVOIR+

### Thèses et HDR

- Cosmologie avec les amas de galaxies dans l'expérience NIKA2, Corentin Hanser, Université Grenoble Alpes, 2024
- Cosmologie multi-longueur d'onde avec les amas de galaxies, Miren Muñoz-Echeverría, Université Grenoble Alpes, 2023, <https://theses.hal.science/tel-04497011>

### Principales publications

1. F. Kéruzoré et al., *Open J. Astrophys.* 6 (2023) 9, PANCO2: a Python library to measure intracluster medium pressure profiles from Sunyaev-Zeldovich observations, <https://astro.theoj.org/article/72788-panco2-a-python-library-to-measure-intracluster-medium-pressure-profiles-from-sunyaev-zeldovich-observations>
2. M. Muñoz-Echeverría et al., *Astron. Astrophys.* 671 (2023) A28, Multi-probe analysis of the galaxy cluster CL J1226.9+3332 - Hydrostatic mass and hydrostatic-to-lensing bias, [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2023/03/aa44981-22/aa44981-22.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2023/03/aa44981-22/aa44981-22.html)
3. A. Ritacco et al., *PASP* 136 (2024) 115001, Absolute Reference for Microwave Polarization Experiments. The COSMOCal Project and its Proof of Concept, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/ad8aed>
4. J. F. Macías-Pérez et al., *PASP* 136 (2024) 114505, KISS: Instrument Description and Performance, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1538-3873/ad8189/meta>
5. A. Jiménez Muñoz et al., *A&A* 686 (2024) A257, The Three Hundred: Contrasting cluster galaxy density in hydrodynamical and dark matter simulations, <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2024/06/aa47448-23.pdf>
6. M. Muñoz-Echeverría et al., *A&A* 682 (2024) A147, The hydrostatic-to-lensing mass bias from resolved X-ray and optical-IR data, [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2024/02/aa47584-23/aa47584-23.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2024/02/aa47584-23/aa47584-23.html)
7. M. Muñoz-Echeverría et al., *A&A* 682 (2024) A124, Galaxy cluster mass bias from projected mass maps. THE THREE HUNDRED-NIKA2 LPSZ twin samples, [https://www.aanda.org/articles/aa/full\\_html/2024/02/aa46986-23/aa46986-23.html](https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2024/02/aa46986-23/aa46986-23.html)
8. A. Ferragamo et al., *A&A* 661 (2022) A65, Comparison of hydrostatic and lensing cluster mass estimates: A pilot study in MACS J0647.7+7015, <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2022/05/aa40276-21/aa40276-21.html>
9. A. Fasano et al., *A&A* 656 (2021) A116, Accurate sky signal reconstruction for ground-based spectroscopy with kinetic inductance detectors, <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2021/12/aa41419-21/aa41419-21.html>
10. L. H. Arnaldi et al., *Proc. SPIE* 13102, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy XII, 131022F (16 August 2024), CMB-S4 SiGe ASIC-based daughter board for low-temperature detectors front-end analog readout, <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13102/131022F/CMB-S4-SiGe-ASIC-based-daughter-board-for-low-temperature/10.1117/12.3020728.short>

### Ressources Web

- Site web de Nika2 : <https://nika2.osug.fr/>
- Site web de Concerto : <https://mission.lam.fr/concerto/>
- Site web du télescope spatial Euclid : <https://www.euclid-ec.org/>
- Site web de l'Observatoire Simons : <https://simonsobservatory.org/>
- Site web de l'expérience CMB-S4 : <https://cmb-s4.org/>
- Site web du GIS KIDS grenoblois : <https://gis-kids.cnrs.fr/>
- Site web de l'ERC RadioForeground+ : <https://research.iac.es/proyecto/radioforegroundsplus/>

# ÉQUIPE DARK

Les activités scientifiques de l'équipe DARK vont de l'astroparticule (origine des rayons cosmiques, détection indirecte de matière noire) à la cosmologie (nature de la matière noire et énergie noire). Les expériences dans lesquelles nous sommes impliquées (AMS-02 et l'observatoire Rubin) visent à caractériser le contenu de l'Univers et à en retracer l'évolution. L'équipe, avec le soutien des services techniques du laboratoire, a contribué au développement d'une partie des instruments de ces expériences. Elle est aussi impliquée dans l'analyse des données et leur interprétation, avec une expertise sur les méthodes statistiques et le « machine learning ». Ces différents aspects contribuent à rendre l'équipe multidisciplinaire, avec des compétences en instrumentation, analyse des données et phénoménologie. L'équipe a fusionné avec l'équipe COSMO-ML pour former l'équipe cosmologie observationnelle en juin 2024.

## **Membres permanents**

Johan Bregeon, Céline Combet, Cyrille Doux, Marine Kuna, David Maurin (responsable d'équipe), Anna Niemiec.

## **Membres non permanents**

Eduardo José Barroso (doctorant visiteur), Marina Masson (doctorante), Calum Murray (post-doc), Constantin Payerne (doctorant), Matthieu Pélissier (doctorant), Manon Ramel (doctorante).

## **Personnels des services techniques**

Antoine Bernard, Guillaume Dargaud (Service Informatique), Ludovic Eraud, Éric Lagorio (Service Électronique), Pierre de Lamberterie, Marc Marton (Service Détecteurs et Instrumentation), Myriam Migliore (Pôle accélérateurs et sources d'ions), Mile Kusulja, Francis Vezzu (Service Études et Réalisations Mécaniques).

# Observatoire Rubin, relevé LSST et énergie noire

La cosmologie observationnelle, et en particulier les observations de supernovæ lointaines, a montré que l'Univers est en expansion accélérée. Cette accélération peut être expliquée par l'ajout d'une composante

énergétique de pression négative, semblable à une constante cosmologique, mais d'origine encore inconnue. Pour mieux comprendre la nature de cette composante (appelée énergie noire) et l'ensemble du modèle cosmologique, le « Legacy Survey of Space and Time » (LSST), mené par l'Observatoire Vera C. Rubin (Chili, figure 1), va permettre de tracer l'histoire de l'expansion de l'Univers via un certain nombre de sondes cosmologiques. Le télescope va observer l'ensemble du ciel austral, environ trois fois par semaine, pendant dix ans, et détectera des millions de supernovæ et des dizaines de milliards de galaxies.



Figure 1 (Crédit : Rubin Obs/NSF/AURA).

Photo (avril 2022) de l'observatoire Vera. C. Rubin, en construction au Cerro Pachón, au Chili, à 2682 m d'altitude.

Avec plus de 3,2 milliards de pixels, la caméra placée au foyer du télescope est la plus grande caméra numérique jamais construite. L'IN2P3 a eu la responsabilité de la construction et de la mise en service du système changeur de filtres et les services techniques du LPSC ont développé le chargeur de filtre ainsi que le CCOB (« Camera Calibration Optical Bench »). La

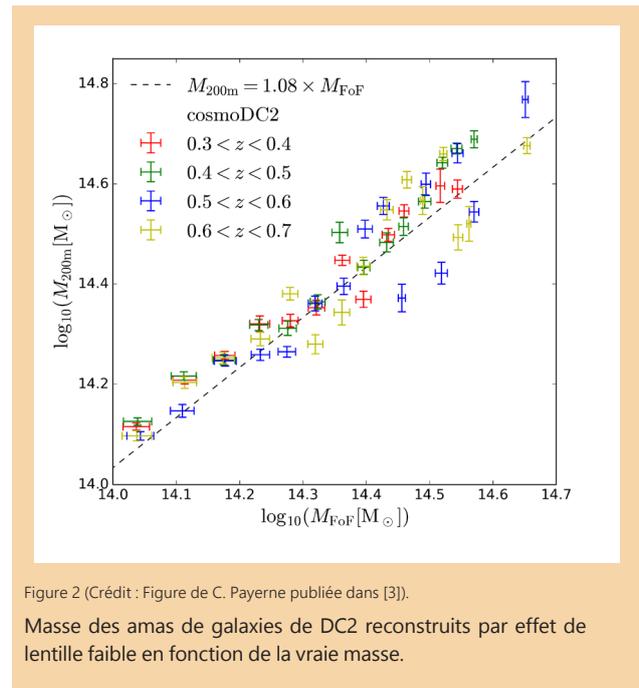
« Dark Energy Science Collaboration » (DESC), dans laquelle l'équipe est largement impliquée, coordonne l'exploitation cosmologique des données du LSST.

## Cosmologie avec les amas de galaxies du LSST

Les amas de galaxies représentent l'ultime étape de formation des grandes structures de l'Univers. Leur distribution en fonction de la masse et du redshift est sensible au contenu en matière et énergie noires, et à leurs propriétés. Utiliser le comptage d'amas comme sonde cosmologique requiert donc d'en connaître leur masse. Dans le domaine visible couvert par l'observatoire Rubin, l'effet de lentille gravitationnelle faible est la méthode de choix pour la reconstruire. Cet effet consiste en une déformation de l'espace-temps due au potentiel gravitationnel de l'amas (donc de sa masse). Il se traduit par une déformation de l'image des galaxies d'arrière-plan (cisaillement) et par une augmentation de leur brillance.

Nous travaillons à concevoir et développer les chaînes d'analyse permettant d'extraire le maximum d'information de la sonde amas de galaxies via l'étude jointe de l'effet de lentille faible et de leur abondance. Comme dans toute analyse visant à contraindre les

paramètres cosmologiques, le contrôle des nombreux effets systématiques (liés aux effets de projection dans les amas, à la calibration de la mesure du cisaillement, à la reconstruction des redshifts, aux choix de modélisation, etc.) est fondamental [3]. Ce travail hautement collaboratif conduit notamment au développement de codes publics, validés entre autres sur des données simulées de la collaboration DESC, comme illustré sur la figure 2.



## Cisaillement gravitationnel avec LSST : des images à l'analyse statistique

Une autre sonde cosmologique étudiée est celle du cisaillement gravitationnel dû aux galaxies, dont la physique sous-jacente est similaire à celle du cisaillement induit par les amas. Une problématique importante pour cette sonde, d'ailleurs commune à l'étude des amas, est celle du chevauchement des galaxies, c'est-à-dire la superposition des galaxies sur la ligne de visée, du fait de la profondeur inégale du relevé LSST. S'il n'est pas corrigé, cet effet pourrait impacter toute la chaîne d'analyse jusqu'à la

reconstruction des paramètres cosmologiques. Nous travaillons donc à quantifier l'impact de ce chevauchement sur l'estimation de masse des amas par lentille gravitationnel et sur la cosmologie.

À l'autre bout de la chaîne d'analyse, les méthodes d'extraction de l'information cosmologique contenue dans les données de lentillage sont aussi abordées. Nous travaillons à la génération de simulations cosmologiques au sein du groupe de travail sur les statistiques non-gaussiennes dans DESC. Ces simulations seront utilisées conjointement avec des outils statistiques novateurs (exploitant l'apprentissage automatique profond) pour des analyses des données de LSST reposant sur des simulations. Des prévisions montrent que ces méthodes, pourvu que les simulations atteignent la précision suffisante, peuvent être quatre fois plus informatives que l'analyse standard basée sur les fonctions de corrélation à deux points. Nous avons déjà mis en œuvre certains de ces aspects dans l'analyse des données du « Dark Energy Survey » [4], précurseur de Rubin-LSST.

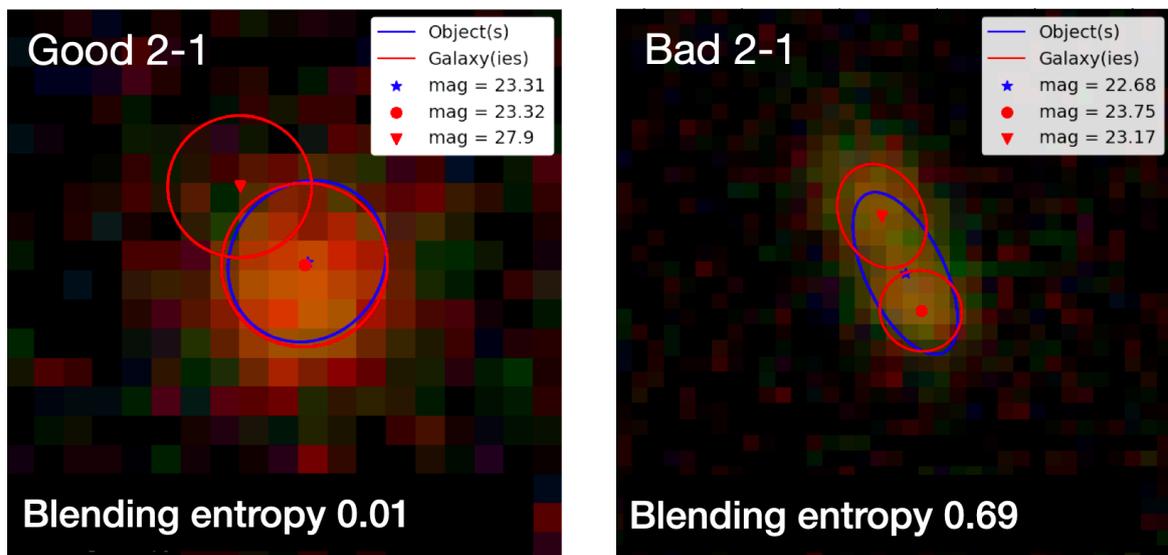


Figure 3 (Crédit : Figure tirée de la thèse de M. Ramel).

Exemples particuliers de chevauchements, dans les systèmes dits 2-1, composés de deux galaxies (en rouge) et d'une détection (en bleu). Le niveau de chevauchement associé à ces systèmes est quantifié à l'aide de l'entropie de chevauchement, où une grande (respectivement petite) valeur décrit les systèmes se chevauchant fortement (respectivement faiblement).

## Courants d'étoiles et contraintes sur la matière noire

Si l'observatoire Rubin est généralement pensé comme un outil pour contraindre la nature de l'énergie noire, il a été démontré que les grands relevés de galaxies fournissent également d'excellents et multiples moyens de contraindre la nature de la matière noire. En particulier, les modèles actuels de matière noire prédisent une formation hiérarchique de halos jusqu'aux masses sub-galactiques. L'étude de l'interaction gravitationnelle entre les halos de matière noire et les courants d'étoiles est l'un des rares moyens de détecter les halos sombres (sans baryons) à ces échelles.

Les courants d'étoiles sont des galaxies naines sphéroïdes ou amas globulaires de la voie lactée qui ont été étirés par effets de marée jusqu'à former des traînées d'étoiles en orbite autour de notre galaxie. En passant à leur proximité, les halos sombres de matière noire dévient et arrachent gravitationnellement des étoiles.

L'analyse des fluctuations de densité des courants stellaires donnent des informations sur ces halos les ayant perturbés. La détection et la caractérisation de ces courants d'étoiles représentent donc un moyen de tester les prédictions des modèles dominants de matière noire froide, et de les comparer aux modèles alternatifs comme ceux de matière noire chaude, floue ou auto-interagissante

Le relevé LSST localisera en dix ans vingt milliards d'étoiles qui permettront de découvrir de nouveaux courants stellaires sous les seuils de détection actuels, et d'augmenter la statistique des étoiles dans les courants déjà connus. Nous préparons les nombreux outils nécessaires à ces études avant de poursuivre avec les analyses du relevé pour, nous l'espérons, apporter un nouvel éclairage sur la matière noire.

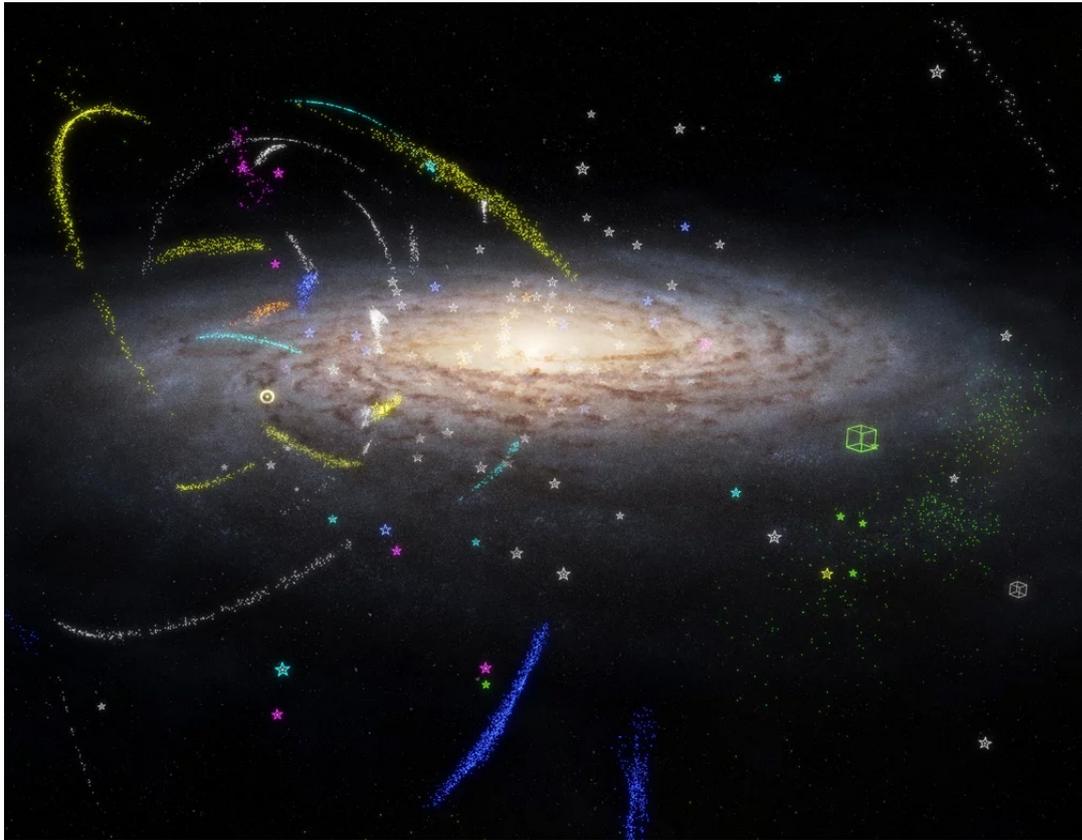


Figure 4. (Crédit : S. Payne-Wardenaar / K. Malhan, MPA).

Vue d'artiste de la Voie Lactée et de ses courants stellaires (points colorés), amas globulaires (symbole 'étoile') et galaxies naines sphéroïdes (petits cubes).

## Ciel transitoire et le “broker” d’alertes FINK de Rubin

Le monitoring profond d’une très large partie du ciel, répété environ tous les trois jours par l’observatoire Rubin, révélera un grand nombre d’objets transitoires. Les alertes, générées via un traitement en ligne des images, et destinées à la communauté astronomique, seront traitées par sept « brokers » d’alertes, dont FINK, développé au sein de l’IN2P3 depuis 2019.

Parmi les millions d’alertes générées chaque nuit, l’équipe s’intéresse à celles qui pourraient révéler l’existence d’émission rémanente en provenance de sursauts

gamma orphelins, c’est-à-dire des sursauts gamma vus à grand angle par rapport à l’axe du jet. Dans cette configuration, les modèles prévoient que l’émission à plus basse énergie (domaines optique et radio) soit observable sous la forme de phénomène transitoire lent et de faible luminosité.

L’équipe a mis en place un pipeline de simulation partant de la génération d’une population réaliste de sursauts gamma, dont l’émission rémanente est ensuite modélisée afin d’en réaliser des pseudo-observations par l’observatoire Rubin. Les premiers résultats encourageants montrent tout le potentiel de découverte de l’instrument (figure 5).

Si plusieurs dizaines de sursauts peuvent être caractérisés, il sera possible de mieux contraindre les populations de sursauts gamma, la structure du jet, etc. Ces informations seront complémentaires aux observations dans le domaine gamma au sol et

dans l'espace, mais aussi aux observations d'ondes gravitationnelles associées avec LIGO/Virgo. Elles permettraient par ailleurs de rechercher des signaux d'ondes gravitationnelles sous le seuil aux localisations et dates des sursauts orphelins détectés dans les données du LSST, amenant à la découverte de nouvelles sirènes standard pour la mesure de la constante cosmologique de Hubble.

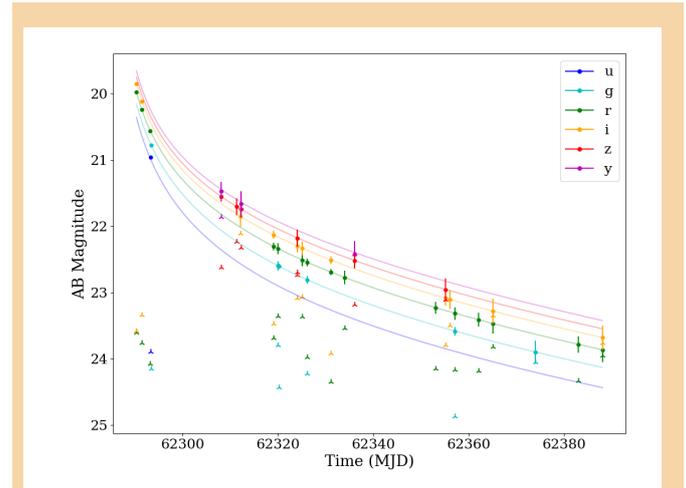


Figure 5 (Crédit : Travail de thèse de Marina Masson).

Simulation de l'observation d'un sursaut gamma orphelin par l'observatoire Vera C. Rubin. L'émission rémanente pourrait être observée pendant plusieurs dizaines de jours et dans plusieurs bandes optiques, fournissant un point de vue inédit sur les sursauts gamma.

## Calcul dans LSST

Rubin va produire une quantité astronomique de données, de l'ordre de 20 PB par an, ce qui implique des infrastructures adaptées et des coûts significatifs pour le projet. Au-delà du traitement des données, les analyses scientifiques seront elles aussi gourmandes en ressources de calcul : l'équipe est très impliquée dans la caractérisation de ces besoins en calcul, en lien avec les responsables scientifiques et techniques du calcul LSST France et le projet RubinOP (financé par la MITI du CNRS en 2023/2024) vise à l'optimisation de la « pipeline » de traitement des données du LSST, dans le but de réduire à la fois les coûts et l'empreinte environnementale du calcul.

# Phénoménologie du rayonnement cosmique galactique et détection indirecte de matière noire

En collaboration avec des membres du LAPTh, LAPP et LUPM, nous avons publiés de nombreuses études sur l'interprétation des mesures de précision d'AMS-02 (détermination des paramètres de transport [7,8], mise à jour de contraintes sur les candidats matières

noire [10], recommandations sur les sections efficaces de fragmentation à mesurer en lien avec l'expérience NA61 au CERN [1], etc.). En 2023, nous avons fourni à la communauté une nouvelle mise à jour de la base de données du rayonnement cosmique [2]

Les aspects détection indirecte de matière noire ont aussi été explorés via les photons gamma, avec des études systématiques menées pour classer les cibles les plus prometteuses (halos sombres, galaxies naines sphéroïdes, amas de galaxies et fond diffus extragalactique) pour les observatoires Fermi et CTAO. Nous avons proposé une classification des cibles matière noire dans le cas d'annihilations dépendants de la vitesse [9]. Une quatrième version du code CLUMPY, qui permet de mener ces études, est en préparation (code très utilisé dans la communauté, en particulier dans des publications H.E.S.S., CTAO, HAWC et ANTARES).

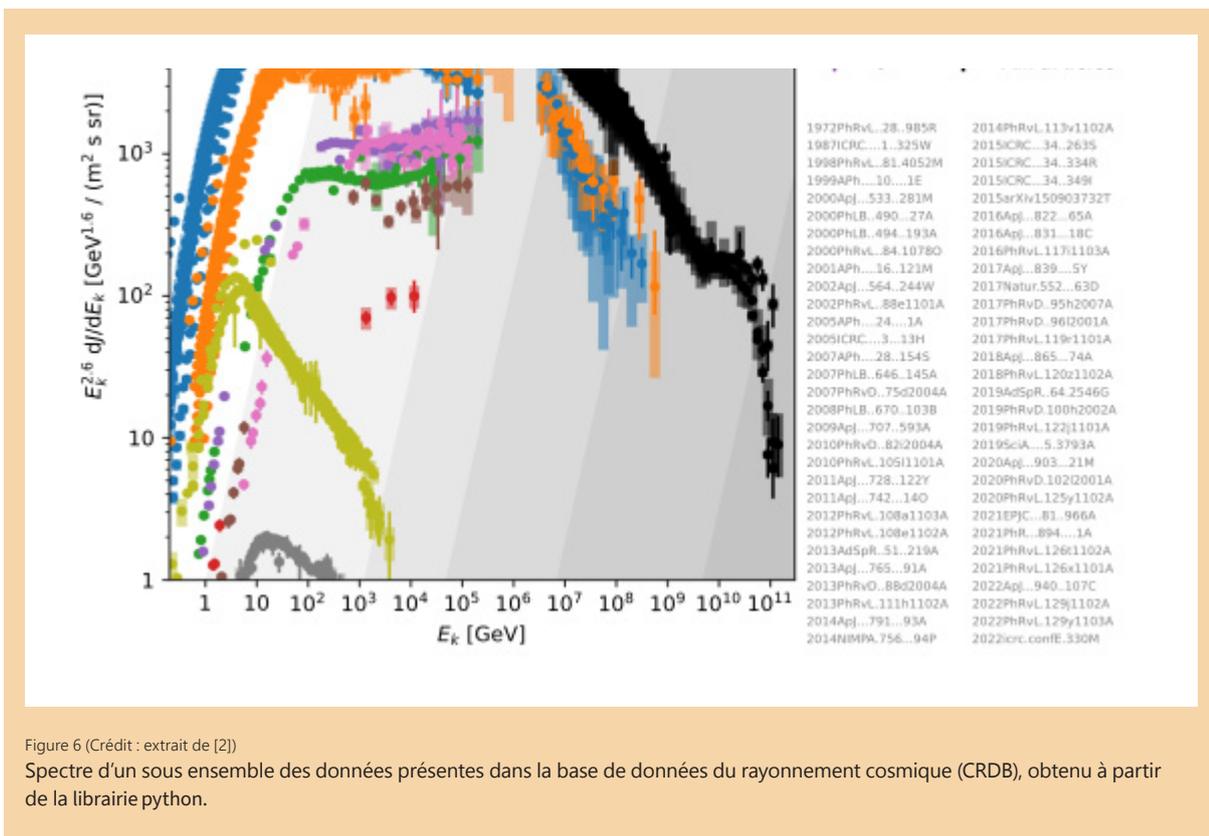


Figure 6 (Crédit : extrait de [2])

Spectre d'un sous ensemble des données présentes dans la base de données du rayonnement cosmique (CRDB), obtenu à partir de la librairie python.

Par ailleurs, nous avons contribué à l'ANR Franco-Allemande Micro (2020-2024), en particulier via le développement du code `micro_combined_fit`<sup>1</sup> qui permet d'ajuster de manière consistante le spectre en énergie, la distribution en masse et la direction

d'arrivée des rayons cosmiques de ultra-haute énergie.

Soulignons que ces activités en lien avec le rayonnement cosmique sont en forte décroissance dans l'équipe, remplacées par des activités en lien avec le grand relevé LSST.

<sup>1</sup> <https://github.com/micro-uhecr/>

## POUR EN SAVOIR+

### Thèse

- Cosmologie avec les amas de galaxies à l'ère du Rubin-LSST, Constantin Payerne (prix de thèse académique de l'UGA), thèse de l'Université Grenoble Alpes, Octobre 2023, <https://theses.hal.science/tel-04405434v1>

### Principales publications

1. Current status and desired precision of the isotopic production cross sections relevant to astrophysics of cosmic rays. II. Fluorine to Silicon and updated results for Li, Be, and B, Génolini, Maurin, Moskalenko & Unger, [PRC 109, 064914 \(2024\)](#)
2. A cosmic-ray database update: CRDB v4.1, Maurin et al., [EPJC 83, 971 \(2023\)](#)
3. Testing the accuracy of likelihoods for cluster abundance cosmology, Payerne, Murray, Combet, Doux et al. [MNRAS 520, 6223 \(2023\)](#)
4. Dark energy survey year 3 results: cosmological constraints from the analysis of cosmic shear in harmonic space, Doux et al., [MNRAS 515, 1942 \(2022\)](#)
5. Cosmology with the Roman Space Telescope - Synergies with CMB lensing, Lukas, Doux et al., [MNRAS 512, 5311 \(2022\)](#)
6. Validating Synthetic Galaxy Catalogs for Dark Energy Science in the LSST Era, Kovacs et al., [OJAp 5, 1 \(2022\)](#)
7. The importance of Fe fragmentation for LiBeB analyses. Is a Li primary source needed to explain AMS-02 data?, Maurin et al., [A&A 668, A27 \(2022\)](#)
8. A simple determination of the halo size from  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  data, Maurin et al., [A&A 667, A25 \(2022\)](#)
9. Classification of gamma-ray targets for velocity-dependent and subhalo-boosted dark-matter annihilation, Lacroix et al., [JCAP 10, 021 \(2022\)](#)
10. AMS-02 antiprotons and dark matter: Trimmed hints and robust bounds, Calore et al., [SciPost Physics 12, 163 \(2022\)](#)

### Ressources

- Reconstruction de la masse des amas par cisaillement gravitationnel ([CLMM](#))
- Base de données du rayonnement cosmique ([CRDB](#))
- Code de propagation du rayonnement cosmique ([USINE](#))
- Code de calcul des flux  $\gamma$  et neutrinos matière noire ([CLUMPY](#))
- Expérience AMS-02 (<https://ams02.space/>)
- Collaboration DESC (<https://lsstdesc.org/>)
- Rubin-LSST France (<https://www.lsst.fr/>)
- Broker d'alertes FINK (<https://www.fink-broker.org/>)
- Intergiciel DIRAC : (<https://dirac.readthedocs.io/en/latest/>)

# ÉQUIPE MIMAC

Les observations astrophysiques convergent depuis plusieurs décennies vers un modèle standard cosmologique et justifient l'hypothèse de l'existence de matière sombre aussi bien à grande échelle qu'à l'échelle locale de notre galaxie. La détection directe des particules constituant cette matière est un défi majeur de la physique. Les neutrons et les neutrinos par leur diffusion cohérente sur les noyaux constituent un fond ultime pour ce type de détection. Le projet MIMAC (Micro-TPC Matrix of Chambers) développe un détecteur directionnel de matière sombre, permettant ainsi de compter sur une signature nouvelle, unique et nécessaire, la directionnalité, afin de corrélérer le mouvement relatif de notre système solaire autour du centre galactique avec l'évènement rare détecté dans le détecteur. Le projet MIMAC propose de construire une grande matrice de micro-TPC à basse pression (50 mbar) afin de détecter par ionisation les traces de reculs nucléaires en 3D. Les noyaux cibles peuvent être changés en masse et/ou spin afin d'optimiser le transfert d'énergie cinétique et la section efficace d'interaction. Les noyaux cibles privilégiés actuellement sont :  $^{19}\text{F}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ .

## Membres permanents

Ali Dastgheibi Fard, Olivier Guillaudin, Fabrice Naraghi, Daniel Santos (responsable d'équipe).

## Membres non permanents

Cyprien Beaufort (doctorant puis post-doctorant), Mar Bastero-Gil (professeure invitée de l'Université de Grenade), Ilias Ourahou (doctorant).

## Personnels des services techniques

Marc Marton, Jean-François Muraz, Melvyn Reynaud, Nadine Sauzet (Service Détecteurs & Instrumentation), Olivier Bourrion, Cairo Pimienta Cheble Caplan, Christophe Hoarau, Laurent Gallin-Martel, Eric Lagorio, Fatah Rarbi (Service Électronique), Romain Bourroux, Julien Giraud, Francis Vezzu (Service Etudes et Réalisations Mécaniques), Thierry Descombes (Service Informatique).

## La détection directionnelle avec MIMAC de reculs de $^1\text{H}$ et de $^{12}\text{C}$ dans la plage du keV

Nous avons réussi à faire la spectroscopie neutronique d'un champ mono-énergétique de 27 keV [1] à partir de la distribution angulaire de reculs de proton ( $^1\text{H}$ ) et de carbone ( $^{12}\text{C}$ ), figure 1 (gauche), associée à la mesure du facteur de quenching faite sur l'installation COMIMAC du LPSC (source d'ion COMIC (Compact Microwave Coaxial) avec une chambre de mesure). Les deux types de reculs nucléaires donnent la même énergie du champ neutronique, voir figure 1 (droite).

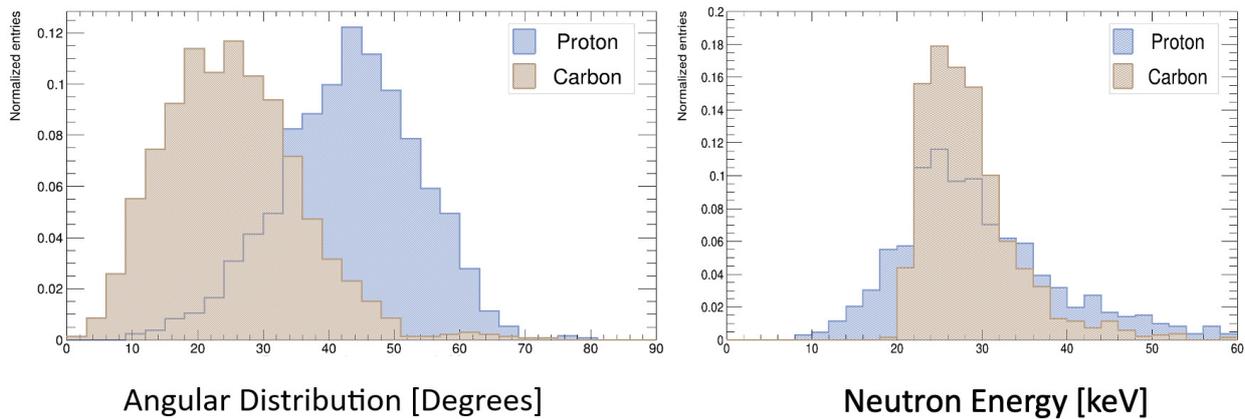


Figure 1 (Crédit : Cyprien Beaufort, LPSC).

Distribution angulaire (à gauche) et spectre d'énergie des neutrons (à droite) reconstitués à partir de reculs de protons et de noyaux de carbone détectés lors de la campagne à 27 keV. L'angle de diffusion est reconstruit à partir de la méthode 3D à gain élevé. Le spectre de l'énergie neutronique intègre toutes les incertitudes systématiques de l'analyse (étalonnage, IQF, discriminations, reconstruction d'angle).

## Premiers évènements du détecteur 35 x 35 cm<sup>2</sup> couplé à sa nouvelle carte électronique

Après plusieurs années de travail de design du détecteur Micromegas, voir figure 2 (gauche), de nouveaux connecteurs, d'une nouvelle cage de champ (figure 2 (centre)) et de mise au point de la nouvelle carte électronique 1792 voies, voir figure 2 (droite), nous avons pu prendre des première données avec la nouvelle chambre MIMAC en mai 2024. Elle sera la brique élémentaire pour construire une micro-TPC aussi grande que nécessaire pour faire la détection directionnelle de WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles).

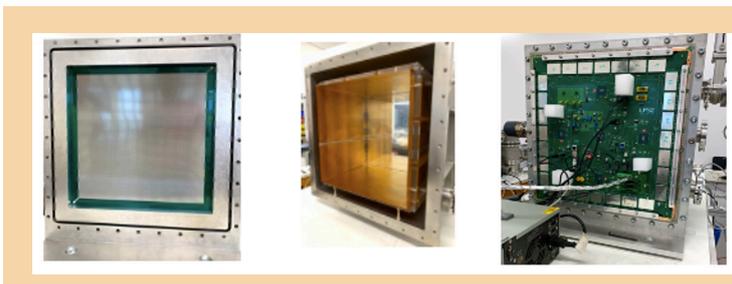


Figure 2 (Crédit : Olivier Guillaudin, LPSC).

Photos de la bi-chambre de 35 x 35 cm<sup>2</sup>, à gauche, du détecteur Micromegas (design d'Olivier Guillaudin, fabrication au CERN), au centre, de la cage du champ de collection de charges et à droite, de la carte électronique de 1792 voies.

## NEWS-G (New Experiments With Sphere-Gas)

L'équipe participe à une recherche directe non-directionnelle à basse masse de WIMPs (projet NEWS-G (New Experiments With Sphere-Gas)) basée sur un détecteur sphérique dont le détecteur est un ensemble de 11 billes placées en son centre.

Ce détecteur sphérique est installé depuis janvier 2022 au SNOLAB Sudbury-Canada. Au sein de la collaboration NEWSG, l'équipe du laboratoire a la responsabilité de la mesure du facteur de quenching en ionisation jusqu'à très basse énergie ( $\sim 100$  eV) et ce grâce notamment aux possibilités offertes par notre ligne COMIMAC. Avant d'être installée au SNOLAB, la sphère de 140 cm de diamètre a été intégrée et testée au laboratoire souterrain de Modane (LSM). Une mesure dans le méthane à 135 mbar a pu être effectuée pendant quelques semaines au LSM, ce qui a permis de faire une première courbe d'exclusion compétitive [2].

## Détection Directionnelle de Dark Photons dans la plage de 1 meV avec l'antenne DANDELION

Une nouvelle expérience d'antenne parabolique, DANDELION (Dark photoN DirEctionaL detec-tION), à la recherche de « Dark Photons » (DP) avec des masses autour de 1 meV a commencé à acquérir des données en janvier 2024, suivie par une deuxième expérience en octobre 2024. Un miroir sphérique agit comme une surface de conversion entre les DP et les photons standards qui convergent vers une matrice de 418 détecteurs à inductance cinétique (Kids) refroidis à 150 mK. Une inclinaison du miroir à 1 Hz déplace le signal attendu sur les pixels permettant ainsi une mesure de fond à chaque seconde [3].

### POUR EN SAVOIR +

#### Thèse

- Détection directionnelle de WIMP et recherche d'axions en dimensions supplémentaires avec le détecteur MIMAC, Cyprien Beaufort, Université Grenoble-Alpes, 2022, <https://theses.fr/2022GRALY089>

#### Principales publications

1. Directional detection of keV proton and carbon recoils with MIMA, C. Beaufort, O. Guillaudin, D. Santos, N. Sauzet, E. Mobio, R. Babut, C. Tao, 2024 JINST 19 P05052, [arXiv:2312.12842](https://arxiv.org/abs/2312.12842)
2. Search for light dark matter with NEWS-G at the LSM using a methane target, M. M. Arora, L. Balogh, C. Beaufort et al., soumis au PRL, [arXiv:2407.12769](https://arxiv.org/abs/2407.12769)
3. Directional detection of meV dark photons with Dandelion, C. Beaufort, M. Bastero-Gil, A. Catalano, D-S. Erfani-Harami, O. Guillaudin, D. Santos, S. Savorgnano, F. Vezzu, JCAP06(2024)058 [arXiv:2310.16505](https://arxiv.org/abs/2310.16505)

# ÉQUIPE NEUTRINO

L'équipe NEUTRINO a été fortement impliquée dans l'étude de l'anomalie des neutrinos de réacteur avec l'expérience STEREO installée auprès du réacteur de recherche de l'Institut Laue Langevin (ILL) à Grenoble. Après avoir produit des résultats à forte visibilité, l'expérience a été entièrement démontée et l'équipe s'est engagée dans deux nouveaux projets d'étude des propriétés fondamentales des neutrinos : le projet à long terme DUNE utilisant un faisceau de neutrinos produits par un accélérateur pour des mesures de précisions des oscillations de neutrinos à longue distance et le projet RICOCHET de mesure précise de la diffusion cohérente de neutrinos auprès du réacteur de l'ILL. Par ailleurs, les avancées technologiques développées dans le cadre du projet RICOCHET ont permis d'envisager d'utiliser cette technologie pour la détection directe de la matière noire, c'est pourquoi l'équipe s'est rapprochée de la collaboration TESSERACT afin d'installer une futur expérience multi-technologie au Laboratoire souterrain de Modane (LSM).

## Membres permanents

Steven Calvez, Corinne Goy, Jacob Lamblin, Valentina Novati, Jean-Sébastien Réal, Jean-Stéphane Ricol, Arnaud Robert, Silvia Scorza, Anne Stutz (responsable d'équipe).

## Membres non permanents

Juliette Blé (doctorante), Guillaume Chemin (doctorant), Joël Dai (doctorant), Thomas Kosc (post-doctorant), Matthieu Licciardi (post-doctorant), Joshua Pinchault (doctorant), Renaud Serra (doctorant), Birgit Zatschler (post-doctorante), Stefan Zatschler (post-doctorant).

## Personnels des services techniques

Julien Giraud, Johann Menu, Éric Perbet, Francis Vezzu (Service Études et Réalisations Mécaniques), Mohammed Chalal, Murielle Heusch, Marc Marton, Jean-François Muraz, Melvyn Reynaud (Service Détecteurs et Instrumentation), Olivier Bourrion, Olivier Choulet, Christophe Hoarau, Éric Lagorio, Nicolas Ponchant, Fatah Rarbi, Damien Tourres, Jonathan Waquet (Service Électronique).

# STEREO rejette l'hypothèse du neutrino stérile

L'existence d'un neutrino stérile est une extension naturelle du modèle standard élaboré par les physiciens des particules. Cette particule permettrait d'expliquer des phénomènes physiques encore incompris, comme la matière noire, et les physiciens ont cru en déceler la trace dans plusieurs expériences auprès de réacteurs nucléaires, sous la forme d'un déficit de neutrinos issus de la fission par rapport à la prédiction.

Afin d'étudier le déficit de neutrinos émis lors des désintégrations radioactives des produits de fission, la collaboration franco-allemande STEREO à laquelle nous avons participé a placé un détecteur composé de six cellules identiques à moins de dix mètres du cœur du réacteur de l'ILL. Le détecteur était idéalement placé pour chercher, avec une précision inédite, la signature des neutrinos stériles : au-delà d'un simple déficit en neutrinos, des changements dans leur distribution en énergie devaient apparaître.

Pendant 4 ans, de 2017 à 2020, suivis de deux années d'étude des données, 107 558 neutrinos ont été observés, mais sans trace d'un neutrino stérile. Restait à expliquer d'une autre manière le déficit, toujours présent, de neutrinos. La précision des mesures de STEREO est telle que la collaboration a pointé vers une autre direction : ce sont non pas les expériences détectant les neutrinos mais les données nucléaires utilisées pour la prédiction des désintégrations qui seraient biaisées.

La distribution en énergie des neutrinos de la fission de l'uranium  $^{235}\text{U}$  fournie par STEREO (figure 1) devient ainsi une donnée de référence, qui motive un vaste programme de réévaluation des émissions bêta des produits de fission décrits dans les bases de données nucléaires. Les résultats de STEREO posent également des bases solides pour les prochaines générations d'expériences auprès des réacteurs. Ils ont été publiés dans *Nature* en janvier 2023 [1].

Les physiciens du LPSC ont aussi proposé d'utiliser l'expérience STEREO, comme détecteur de neutron et non plus de neutrino, pour repousser de plus d'un ordre de grandeur les limites sur l'existence d'un état stérile du neutron, appelé aussi « neutron caché », prévu par plusieurs théories (neutron miroir, mondes branaires, ...) [2].

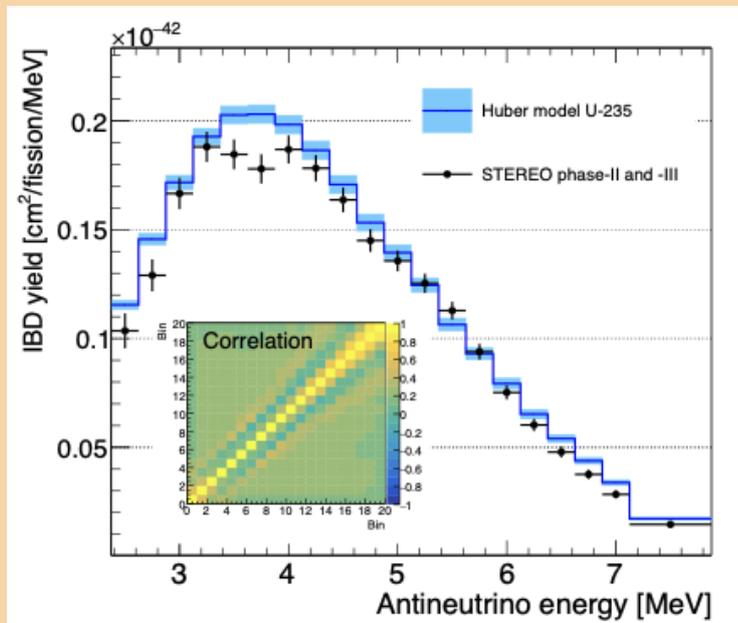


Figure 1 (Crédit : Figure extraite de *Nature*, 613 (2023) 257-261).

Le spectre d'antineutrinos associé à la fission de  $^{235}\text{U}$  déconvolué de la réponse du détecteur (points noirs) est représenté avec la prédiction dans l'espace d'énergie des antineutrinos (histogramme bleu). Les barres verticales et la bande bleue représentent les incertitudes totales respectives à un niveau de confiance de 68 %. L'axe vertical donne le rendement absolu de la désintégration bêta inverse. La matrice illustre les corrélations. La mesure de STEREO étant statistiquement limitée, le modèle de corrélations observé autour de la diagonale est principalement induit par le processus de déconvolution.

## DUNE, une expérience phare pour la science des neutrinos

L'expérience DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) vise à mesurer précisément les oscillations de neutrinos. Pour cela, un faisceau très intense de neutrinos sera produit grâce à un accélérateur au FermiLab à Chicago. Les neutrinos seront détectés après avoir traversé 1300 km de matière, dans une mine du Dakota du Sud à 1500 m sous terre par quatre très grands instruments (60 m de long, 12 m de largeur et de hauteur) remplis d'argon liquide. Le nombre de neutrinos détectés comparé au nombre produit permettra d'accéder aux paramètres d'oscillation, à la hiérarchie de masse (l'ordre des masses des neutrinos) et à la possible différence d'interaction entre les neutrinos et antineutrinos. Les neutrinos qui interagissent créent différents types de particules dont les traces seront enregistrées et analysées pour déterminer l'énergie et la saveur (muonique ou

électronique) du neutrino détecté. L'expérience est en cours de construction et devrait commencer à prendre des données en 2030 avec deux détecteurs basés sur le même principe, mais avec des technologies différentes. De tels détecteurs doivent être validés avant de démarrer la construction. Dans ce contexte, le CERN a développé une plateforme neutrino dans laquelle la collaboration DUNE a construit 2 prototypes de petite échelle (un cube de 8 m de côté) afin de valider la faisabilité et la tenue dans le temps des technologies envisagées.

Le LPSC a rejoint la collaboration internationale DUNE en 2019. Notre activité s'inscrit dans le cadre de l'effort international porté par la France et le CERN sur une technologie nouvelle d'une chambre à dérive verticale plus facile à construire, à installer et à opérer tout en étant moins onéreuse. Cette technologie est décrite en détail dans le Technical Design Report [3]. Elle est en cours de validation sur un dernier prototype, le Module0 installé au CERN (figure 2). Ce prototype, de dimension 6x6x3,5 m<sup>3</sup>, représente 1/40 du détecteur final et prendra des données avec des rayons cosmiques et des faisceaux de hadrons dès début 2025.

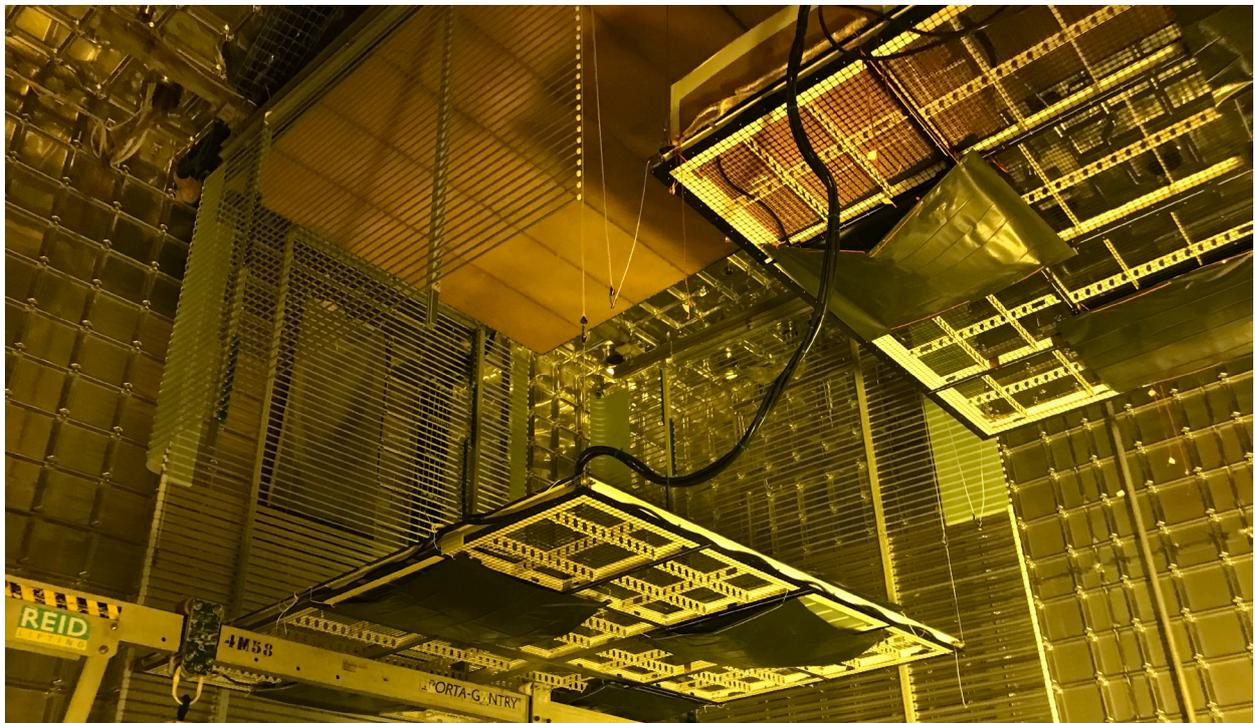


Figure 2 (Crédit : LPSC, CNRS).

Prototype Module0 du détecteur à dérive verticale au CERN. Les plans de lecture en haut (orange) permettent de récolter les électrons issus de l'interaction des particules avec l'argon liquide. Ces électrons, une fois créés dans le volume d'argon, sont conduits sur les plans de lecture grâce à un champ électrique constant (la dérive) obtenu avec une différence de potentiel de 150 kV entre les plans de lecture et la cathode (en blanc au milieu). Les plans de lecture fournissent une localisation à deux dimensions, la troisième dimension est donnée par le temps que les électrons mettent à traverser l'argon. Après installation, le cryostat est fermé et le volume entier est rempli d'argon liquide.

Le LPSC a contribué à la construction, aux tests et à l'analyse des nouveaux plans de lecture, ainsi qu'à leur installation dans le Module0. Nous avons développé des capteurs capacitifs, ainsi que leur électronique, pour positionner très précisément les plans de lecture par rapport à la surface d'argon liquide. Ils seront aussi utilisés pour positionner la cage de champ électrique entourant les plans de lecture du détecteur final. Nous avons installé ces moniteurs de position dans le Module0, ce qui permettra de les valider à l'échelle réelle avant de lancer leur production en 2025-2026. Ce développement a pu se faire grâce à un fort soutien du Service Électronique du laboratoire.

Nous avons également construit et installé un détecteur de muons cosmiques, ainsi que son électronique, afin de sélectionner des muons cosmiques permettant de caractériser la reconstruction de particules avec le détecteur à dérive verticale. Nous sommes responsables de son fonctionnement.

Pour le détecteur final, notre équipe a pris en charge la construction et la caractérisation de la moitié des plans de lecture du détecteur à dérive verticale. A ces fins nous avons développé une ligne de montage et de test dans le hall Ariane (figure 3) grâce à un fort soutien du Service Détecteurs et Instrumentation du laboratoire. Les différents composants seront livrés

depuis le CERN et les États-Unis pour être assemblés au LPSC. Entre 2025 et 2026, cette ligne de production devra produire, tester et envoyer à SURF (Sanford Underground Research Facility) 148 plans de lecture qui seront installés sur le détecteur à dérive verticale. Un dispositif de tests précis et rapide a été développé pour s'assurer de la qualité des plans de lecture avant leur expédition.

Pour cela, nous avons construit trois tentes propres avec des qualités d'air meilleures qu'ISO8. La plus grande de 40 m<sup>2</sup> servira à l'assemblage de tous les composants et aux premiers tests à chaud. La seconde contient une cuve remplie d'azote liquide à -196 °C dans laquelle seront plongés les plans de lecture. Ces détecteurs seront utilisés in fine dans l'argon liquide à -186 °C et doivent être testés dans des conditions similaires. Pour ces tests à froid le groupe a fait installer à proximité un tank de 27000 litres d'azote liquide. La dernière tente servira à stocker les détecteurs pendant leur réchauffement avant d'être emballés dans une structure, également développée par le LPSC, qui permettra de les acheminer depuis Grenoble jusque dans la mine en toute sécurité. La validation de chaque détecteur sera faite grâce à une mesure rigoureuse de toutes les connections électriques à chaud et à froid.



Figure 3 (Crédit : LPSC, CNRS).

Ligne d'assemblage des modules de détection TOP du premier détecteur de l'expérience DUNE. 148 modules vont être assemblés, testés et validés à -196 °C entre 2025 et 2026. Trois tentes propres (ISO 8) ont été construites. Les modules seront ensuite emballés puis mis en caisse pour les envoyer à SURF (Sud-Dakota États-Unis). Le LPSC contribuera à leur installation sur place en 2027.

Les détecteurs finaux seront mis en service en 2029, mais le faisceau de neutrinos ne sera pas opérationnel avant 2031. Dans ce contexte, l'équipe a étudié la sensibilité de l'expérience DUNE aux neutrinos atmosphériques pour contraindre les paramètres d'oscillation et la détermination de la hiérarchie de masse en utilisant le fait qu'une partie du flux incident interagit lors de sa traversée de la terre. Cette étude a été le sujet d'une thèse qui a montré la difficulté de contraindre les paramètres d'oscillation avant

l'avènement du faisceau. Cette étude a néanmoins permis de mettre en évidence les points cruciaux à améliorer pour optimiser la sensibilité de l'expérience, soulignant en particulier la nécessité d'un contrôle strict de la résolution angulaire des événements reconstruits. Par ailleurs, les développements afférents ont permis à l'équipe de prendre pied dans les analyses statistiques fondées sur les méthodes Monte-Carlo par chaînes de Markov qui seront au cœur de l'analyse des événements issus du faisceau.

## RICOCHET et la diffusion cohérente des neutrinos

Depuis sa prédiction, il y a plus de 40 ans, la diffusion élastique cohérente neutrino-noyau (CENNS) suscite un grand intérêt car elle offre une grande variété d'opportunités scientifiques. Du point de vue de la physique des particules, elle permettrait de sonder la physique au-delà du modèle standard comme par exemple l'existence de nouveaux médiateurs massifs. Du point de vue astrophysique, la diffusion cohérente régit la dynamique de l'explosion des supernovae et donc l'éjection de matière vers l'extérieur. De plus, comme elle constitue le bruit de fond ultime de la détection directe de matière noire, une mesure et une compréhension claire de la diffusion cohérente est indispensable pour valider à la fois les modèles de bruit de fond et de réponse de la prochaine génération des détecteurs de matière noire. En août 2017, une première observation de ce processus a été réalisée par l'expérience COHERENT avec des neutrinos d'environ 30 MeV. Cependant, même si cette détection a prouvé l'existence de cette interaction, elle présente une sensibilité limitée aux processus de nouvelle physique car la cohérence de l'interaction nécessite des neutrinos de plus faible énergie (<10 MeV). De tels neutrinos sont produits abondamment par le Soleil et auprès des réacteurs nucléaires mais ils induisent par diffusion élastique des reculs nucléaires d'énergie inférieure au keV, rendant leur détection particulièrement difficile.

Fort de son expérience acquise avec l'expérience STEREO, l'équipe du LPSC a rejoint la collaboration RICOCHET, qui envisage de détecter la

diffusion cohérente avec des détecteurs cryogéniques semi-conducteurs Ge, en proposant d'installer l'expérience auprès du réacteur de l'ILL. Bien qu'il constitue une source de neutrinos plus faible que des réacteurs commerciaux, ce réacteur de recherche permet de positionner les détecteurs à très courte distance (8,8 m) du cœur. L'expérience RICOCHET pourra ainsi bénéficier des résultats de STEREO [1] qui a permis de mesurer précisément le spectre en énergie des antineutrinos émis par le réacteur et d'acquiescer une très bonne connaissance des bruits de fond environnants.

RICOCHET est aujourd'hui une collaboration internationale (France, USA, Canada et Russie) rassemblant environ 80 chercheurs, ingénieurs et techniciens. Les tests de validation des détecteurs réalisés au laboratoire IP2I de Lyon ont permis de démontrer la faisabilité d'une double mesure chaleur-ionisation avec des performances records sur la résolution ligne de base (RMS) de 60 eV (chaleur) et 40 eV<sub>ee</sub> (ionisation) [4], permettant d'obtenir un seuil de discrimination entre reculs électroniques/nucléaires d'environ 300 eV. La réussite de cette étape cruciale a donné le feu vert à la collaboration pour déménager l'expérience à l'ILL.

Le LPSC a eu des contributions fortes pour la préparation et l'installation de l'expérience à l'ILL, et notamment sur la problématique des bruits de fond. En effet, le niveau de bruit de fond sur le site de l'ILL est élevé du fait de la proximité du cœur du réacteur et de la présence d'expériences voisines qui émettent des gammas et des neutrons. Le site est aussi exposé au rayonnement cosmique malgré la protection fournie par la présence d'un canal d'eau au-dessus de la zone RICOCHET. Le signal attendu étant seulement d'environ 10 événements par kilogramme et par jour, une stratégie très efficace d'atténuation du bruit de fond est obligatoire. Le blindage de RICOCHET, dont la conception et la réalisation étaient sous la responsabilité du LPSC, est divisé en deux parties : un blindage

passif, constitué de plomb et de polyéthylène pour arrêter les gammas et les neutrons, et un blindage actif, le veto muon, composé de scintillateurs plastiques, pour rejeter les événements induits par les muons. La géométrie et les épaisseurs des différentes couches de blindage ont été définies par simulation GEANT4, en tenant compte des contraintes liées à l'espace exigü. Le dispositif d'acquisition de données, développé au LPSC dans le cadre de STEREO, a été adapté pour la lecture du veto muon. Pour concevoir et valider ces blindages, plusieurs campagnes de mesures du bruit de fond ont eu lieu sur site entre 2021 et 2023, avec différents types de détecteurs dont le veto muon. Ces mesures, réalisées durant des périodes de réacteur en fonctionnement et à l'arrêt, ont montré que les simulations cosmogéniques reproduisaient correctement le

spectre en énergie et les taux mesurés sur le site de l'ILL [5]. Au final, le taux de bruit de fond de reculs nucléaires total attendu est estimé à  $9 \pm 2$  événements/jour/kg dans la région d'intérêt du CENNS.

Après trois mois d'installation à l'ILL, le cryostat a atteint 8,7 mK le 6 février 2024, permettant le début de la prise de données, avec un miniCryoCube, qui est un module de 3 détecteurs (voir figure 4). Les premiers signaux ont été enregistrés et sont très encourageants.

Les performances du dispositif expérimental ayant pu être validées, l'expérience RICOCHET va pouvoir maintenant démarrer sa phase scientifique. L'installation des 18 détecteurs est prévue début 2025. L'expérience prendra ensuite des données pendant au moins deux ans.

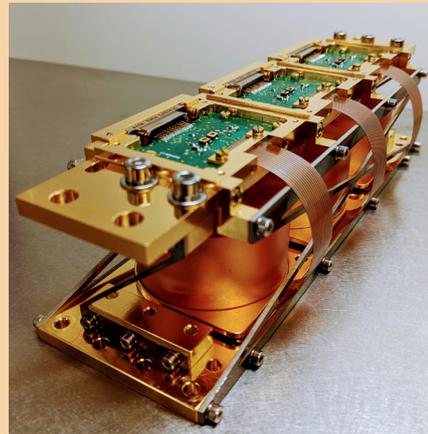


Figure 4 (Crédit : Collaboration RICOCHET).

Photos de Ricochet à l'ILL, cryostat ouvert sans (gauche) et avec (centre) son squelette de blindage 1 K et un mini CryoCube monté sur sa platine « 10 mK déportée ». Droite : photo d'un mini CryoCube avant montage.

## TESSERACT et la détection directe de matière noire

Identifier la nature de la matière noire est une des problématiques majeures de la physique des particules, des astroparticules et de la cosmologie. Pendant des décennies, les efforts théoriques et expérimentaux se sont focalisés sur l'échelle électrofaible pour répondre à cette énigme. Cependant, l'absence de preuve de l'existence d'un WIMP de  $\sim 100 \text{ GeV}/c^2$  dans les expériences de détection directe et au LHC

(Large Hadron Collider) a motivé un important effort pour développer de nouvelles théories, et donc de nouveaux candidats à la matière noire. Ces théories ont permis de mettre en avant toute une classe de modèles de nouvelle physique, incluant ceux de « secteur sombre », proposant des particules candidates à la matière noire ayant des masses bien en-deçà de l'échelle électrofaible.

De façon tout à fait indépendante de tout modèle théorique, si l'on s'en tient seulement au cas où la matière noire est une particule élémentaire, sa masse peut varier de  $10^{-22} \text{ eV}/c^2$  (si elle est un boson) à  $10^{19} \text{ eV}/c^2$ . Cela correspond à un intervalle en masse de 40 ordres de grandeur, très largement inexploré aujourd'hui. Bien qu'il soit encore trop tôt pour rejeter de manière définitive le WIMP comme candidat

à la matière noire, il semble désormais nécessaire de préparer le futur de la recherche de matière noire en élargissant considérablement notre gamme de sensibilité en masse.

C'est dans ce contexte que l'équipe propose, en collaboration avec des chercheurs et techniciens français et américains, de construire une future expérience de matière noire légère, TESSERACT, au Laboratoire Souterrain de Modane, le plus profond d'Europe.

La collaboration se propose de bâtir un programme de recherche visant la détection de la matière noire sur 12 ordres de grandeurs en masse, allant de la fraction d'électronvolt à la masse du proton, ce qu'aucune autre expérience ne peut faire à ce jour, et ce en utilisant une approche multi-cibles afin de sonder tout type d'interactions avec la matière noire.

La contribution française au projet TESSERACT repose sur le projet TES4DM qui vise à intégrer les nouvelles technologies de détecteurs cryogéniques ultra-sensibles et innovants en Ge et Si pour lesquelles elle a acquis une expertise mondialement reconnue [6].

Au printemps 2024 le projet TES4DM a obtenu le financement RI2 dans le cadre du programme « Recherche à risque » du CNRS (France 2030) et la

France s'est officiellement jointe à la collaboration TESSERACT. La contribution française au projet TESSERACT via le projet TES4DM repose sur le développement d'une nouvelle technologie hybride de détecteur cryogénique utilisant des cristaux de semi-conducteurs en Ge et Si et la conception puis la construction d'une infrastructure cryogénique de pointe offrant un environnement de très basse radioactivité permettant l'utilisation des différentes technologies : Ge, Si (CNRS) et He,  $Al_2O_3$ , et GaAs (USA). La nouvelle technologie Ge/Si permettra des modes d'opération optimisés pour la détection de la matière noire interagissant sur les noyaux et sur les électrons.

Le groupe au LPSC a la responsabilité de la mise en service du cryostat TES4DM dans une salle blanche en surface au LPSC ainsi que la conception et la coordination de l'assemblage du blindage. Le LPSC a une forte implication dans la définition et la mise en œuvre de TESSERACT au LSM (salle blanche, blindage, cryostat). Le LPSC envisage aussi un développement en électronique, encore à définir qui pourrait intervenir à l'été 2025. De plus, le groupe au LPSC contribuera aux activités de screening des matériaux via la plateforme à faible bruit de fond du LSM.

## POUR EN SAVOIR +

### Thèse

- Physique des neutrinos et contribution à l'expérience DUNE, Joël Dai, CNRS, 2024

### Principales publications

1. Stereo neutrino spectrum of  $^{235}U$  fission rejects sterile neutrino hypothesis, H. Almazan et al., *Nature*, **613** (2023) 257-261 (2023)
2. Searching for hidden neutrons with a reactor neutrino experiment: Constraints from the STEREO experiment, H. Almazan et al. (2022), *Phys. Rev. Lett.* **128**, 061801 (2022)
3. The DUNE Far Detector Vertical Drift Technology. Technical Design Report, JINST **19** (2024) 08 <https://arxiv.org/abs/2312.03130>
4. First demonstration of 30 eVee ionization energy resolution with Ricochet germanium cryogenic bolometers, Corinne Augier et al., *Eur. Phys. J. C* **84**, 2-186 (2024)
5. Fast neutron background characterization of the future Ricochet experiment at the ILL research nuclear reactor, Corinne Augier et al., *Eur. Phys. J. C* **83**, 1-20 (2023)
6. Transition Edge Sensors with Sub-eV Resolution And Cryogenic Targets (TESSERACT) at the underground laboratory of Modane, J. Billard et al., *Nucl. Phys. B* **1003** (2024) 116465

### Ressources Web

- STEREO : <https://www.stereo-experiment.org/>
- DUNE : <https://www.dunescience.org/>
- DUNE à Fermilab : <https://lbnf-dune.fnal.gov/>
- TESSERACT : <https://tesseract.lbl.gov/>



# PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LA SANTÉ

La problématique Énergie et Santé regroupe les activités de trois équipes de recherche du laboratoire : Physique des Réacteurs, Molten Salt Fast Reactor (MSFR), et Physique Nucléaire et Applications Médicales (PNAM). Elle comprend également une activité de recherche de l'équipe MIMAC sur les neutrons pour la science et la société. Elle revêt un caractère transdisciplinaire, associant des chercheurs et personnels techniques de plusieurs autres entités du laboratoire.

À l'échelle nationale, ces activités s'inscrivent dans le cadre des GDR SCINEE et MI2B, et ont figuré dans les travaux de prospective à 10 ans de l'IN2P3 (Groupes de Travail « Nuclear Energy and the Environment » et « Radiation Physics for Health »).

Face aux enjeux constamment renouvelés de l'énergie nucléaire, qu'il s'agisse des futurs concepts de réacteurs, de la prolongation des systèmes actuels, de la gestion des ressources ou de l'aval du cycle, la recherche académique a plus que jamais un rôle à jouer dans la consolidation des savoirs fondamentaux et l'étude d'approches innovantes. Au plan de la modélisation aussi bien qu'au plan expérimental, les équipes Physique des Réacteurs et MSFR sont engagées dans des recherches au cœur de ces problématiques. Leurs travaux se déclinent depuis l'échelle microscopique des données nucléaires, puis la modélisation neutronique et thermo-hydraulique qui permettent de simuler un système nucléaire, jusqu'aux études de scénarios qui mettent en jeu un ensemble de systèmes et son évolution.

L'application des rayonnements ionisants pour la Santé connaît actuellement des évolutions majeures. Si la radiothérapie est utilisée dans près de la moitié des traitements oncologiques, de nouvelles modalités bousculent certains paradigmes empiriques sur lesquels se fondent les pratiques cliniques. L'utilisation de faisceaux d'ions légers (carbone) en hadronthérapie, de micro-faisceaux X permettant un fractionnement

spatial de la dose, l'utilisation de nanoparticules radio-sensibilisantes, de faisceaux intenses (radiothérapie flash), la radiothérapie interne alpha vectorisée ou par capture neutronique sur le bore, conduisent à des résultats cliniques complémentaires et prometteurs. Cependant, ces techniques soulèvent de nombreux challenges pour les physiciens, concernant le contrôle du traitement et la notion même de dose biologique déposée dans les tissus pathologiques comme dans les tissus sains. Les équipes PNAM et MIMAC contribuent à y répondre par des développements instrumentaux et une modélisation dédiés.

# ÉQUIPE MOLTEN SALT FAST REACTOR MSFR

La caractéristique fondamentale des réacteurs à sels fondus (RSF ou MSR en anglais) réside dans l'utilisation d'un combustible liquide circulant et jouant également le rôle de caloporteur. Cette caractéristique présente des avantages prometteurs pour le design, la sûreté et la fabrication, mais nécessite des avancées méthodologiques et technologiques pour permettre leur réalisation.

Depuis plus de vingt ans, nous analysons et optimisons scientifiquement des RSF innovants pouvant répondre aux besoins de production d'énergie et de gestion des déchets, tout en recherchant la plus grande simplicité. Cela a requis le développement de codes de simulation adaptés, plus génériques, ainsi que la mise en place de collaborations pour regrouper les experts nécessaires et avancer sur la voie de l'industrialisation de tels réacteurs.

## **Membres permanents**

Michel Allibert (expert bénévole), Daniel Heuer (émérite), Axel Laureau, Elsa Merle (responsable d'équipe).

## **Membres non permanents**

Max Begue (doctorant), Louilliam Clot (doctorant), Jad Halwani (doctorant), Thibault Le Meute (doctorant puis post-doctorant), Anna Maitre (doctorante), Laura Mesthiviers (doctorante), Hugo Pitois (doctorant puis post-doctorant), Thomas Sornay (doctorant).

# Présentation des activités de recherche et principales réalisations techniques

Deux types de liquide, tous deux étant des sels fondus, peuvent être utilisés pour contenir le combustible tout en servant de caloporteur dans un réacteur nucléaire – qui s'appelle ainsi réacteur à sels fondus : les sels de fluorure (à base de LiF) et les sels de chlorure (à base de NaCl, notre sel de cuisine). Des études dédiées menées dans l'équipe MSFR ont montré que le cycle du thorium est plus compatible avec un sel fluoré, alors que l'utilisation du plutonium et des actinides mineurs comme combustible conduit à un sel chloruré principalement pour des questions de solubilité. Ainsi les travaux de recherche historiques de l'équipe MSFR axés sur le cycle du thorium concernent des réacteurs à sel fluorure (comme le «MSFR (Molten Salt Fast Reactor) de référence») [1], et les nouveaux développements pour concevoir des réacteurs capables de brûler des déchets nucléaires sont maintenant plus orientés vers des réacteurs à sel de chlorure. Nos thématiques de recherche sont la physique des réacteurs (neutronique, couplage avec la thermohydraulique), la modélisation, les scénarios de déploiement, les données nucléaires et la propagation d'incertitudes, la sûreté et l'analyse de risques, en interaction avec des collègues chimistes et physiciens du CNRS et plus largement académiques, ainsi qu'industriels, et ce dans le cadre des projets et collaborations suivants :

- Le projet européen SAMOSAFER (Severe Accident Modeling and Safety Assessment for Fluid-fuel Energy Reactors – 2019-2023) où nos contributions ont porté sur la définition d'un premier diagramme de fonctionnement du MSFR de référence, sur l'évaluation de l'impact des fluctuations turbulentes de la température à l'intérieur du cœur sur la distribution de la puissance de fission en fonctionnement normal (comme détaillé dans le focus ci-dessous) [2], ainsi que sur la mise au point d'une méthodologie de conception de réacteurs à sels fondus (voir figure 1) par Hugo Pitois dans sa thèse de doctorat, qui l'a appliquée à la définition d'un réacteur MSFR chlorure régénérateur en cycle U/Pu et du concept SyRE en sel chlorure et incinérateur en cœur et à couverture fluorure thoriée [3].
- Le projet européen MIMOSA (Multi-recycling strategies of LWR SNF focusing on MOlten SAlt technology – 2022-2026), via des études neutroniques et couplées multiphysiques, et de scénarios principalement du concept incinérateur RAPTO<sub>r</sub> [4] développé par Laura Mesthiviers dans sa thèse de doctorat entre le CNRS et Orano DRD.
- Le projet BPI/France 2030 ISAC (Innovative System for Actinides Conversion – 2022-2025) : « MSR convertisseur d'actinides (ARAMIS) » piloté par le CEA (collaboration CEA, CNRS, Orano, Framatome, EDF) où nous participons aux volets : « Esquisses MSR » et « Scénarios – Intégration des MSR dans le cycle » avec notamment le financement de la thèse de Louiliam Clot (LPSC/Orano), avec notamment des développements dans le code neutronique en évolution REM [5] et le code de scénario ISF de l'équipe, et de la thèse de Jad Halwani (LPSC/SUBATECH) sur des calculs de puissance résiduelle et les propagations d'incertitudes associées et une analyse de risques du réacteur ARAMIS.
- Notre collaboration avec Orano, qui a débuté en 2018 autour des capacités d'incinérations des actinides dans un RSF de petite taille utilisant un sel chlorure et les scénarios associés avec les thèses de Laura Mesthiviers puis Louiliam Clot, s'est élargie en 2023 avec la thèse de Max Begue sur des calculs multiphysiques pour l'étude du bruit neutronique des réacteurs à sels fondus du fait de leur forte turbulence en cœur [6]. Ces travaux sont également effectués avec l'équipe LRS de l'EPFL et leur réacteur expérimental CROCUS, et sont basés sur l'approche Transient Fission Matrix (TFM) du CNRS mise au point par Axel Laureau avec des développements récents dans le code OpenMC [7].
- Notre collaboration avec Framatome Lyon a principalement concerné la thèse de Thomas Sornay sur l'étude multiphysique et multicritère des réacteurs à sels fondus de type SMR, incluant des contributions au projet ISAC et la mise au point du code couplé neutronique – thermohydraulique TFM-STAR [8]. Ces travaux vont se poursuivre au sein du nouveau projet européen ENDURANCE (2024-2028) avec une future thèse à venir fin 2025. Nous continuons également la collaboration avec CORYS, filiale de Framatome localisée à Grenoble, pour le développement d'un simulateur de pilotage d'un réacteur à sels fondus avec le stage de Léo Laffay

sur l'amélioration du contrôle-commande du simulateur de pilotage du MSFR et l'adaptation au réacteur ARAMIS.

- Une collaboration avec le CEA Cadarache, au travers des thèses de Thibaut Le Meute puis Anna Maître, porte sur le développement d'outils pour étudier les accidents graves des RSF avec la modélisation d'ondes de choc [9].
- L'agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) organise des groupes de travail visant à regrouper les experts et synthétiser les connaissances. Dans ce cadre, nous sommes invités régulièrement à contribuer à des réunions

techniques sur la sûreté des réacteurs innovants notamment les RSF [10].

- Depuis fin 2020, l'équipe travaille en collaboration avec la start-up française NAAREA sur le développement d'un concept de micro réacteur à sels fondus (XAMR) au travers d'une participation au conseil scientifique et de contributions à leurs codes de simulation notamment avec l'approche TFM. Deux post-doctorants ont été financés dans ce cadre en 2023 et 2024, suivis de la thèse CIFRE de Léo Laffay débutant fin 2024 sur l'approche par états pour la sûreté des réacteurs à sels fondus.

## Focus : Du couplage entre neutronique et turbulence fluide au design de cœurs

Le couplage neutronique-thermohydraulique dans un réacteur à sels fondus est caractérisé par un couplage fort, particulièrement sur les aspects temporels avec une dépendance directe de l'amplitude de la puissance neutronique en cœur de l'ordre d'une dizaine de pourcentage par degrés. Cette problématique a été étudiée dans l'équipe depuis une dizaine d'années au travers du couplage stationnaire et des transitoire accidentels avec une résolution des équations de Navier-Stokes moyennées en temps (approche RANS) couplée à une modélisation neutronique dédiée et adaptée au combustible liquide, l'approche TFM. Ce travail avait mené à une première optimisation du design du cœur du MSFR de référence dans le cadre du projet européen EVOL. Cependant, même si l'approche RANS est déjà une modélisation avancée et permet un calcul à l'échelle cœur, elle ne résout pas les premières échelles de la turbulence.

Afin de se rapprocher de la simulation d'un système réel, de premières études ont été réalisées récemment avec des approches résolvant cette fois les grandes échelles des tourbillons (approche DES pour Detached Eddy Simulation) et un nouveau phénomène de couplage est apparu, faisant également remonter une nouvelle contrainte de dimensionnement : même si les variations de température sont faibles, en raison du fort

couplage vers la neutronique une nouvelle configuration du réacteur a dû être mise en place (voir figure 2) afin de limiter les fluctuations de puissance de 7 % à environ 1 % [2].

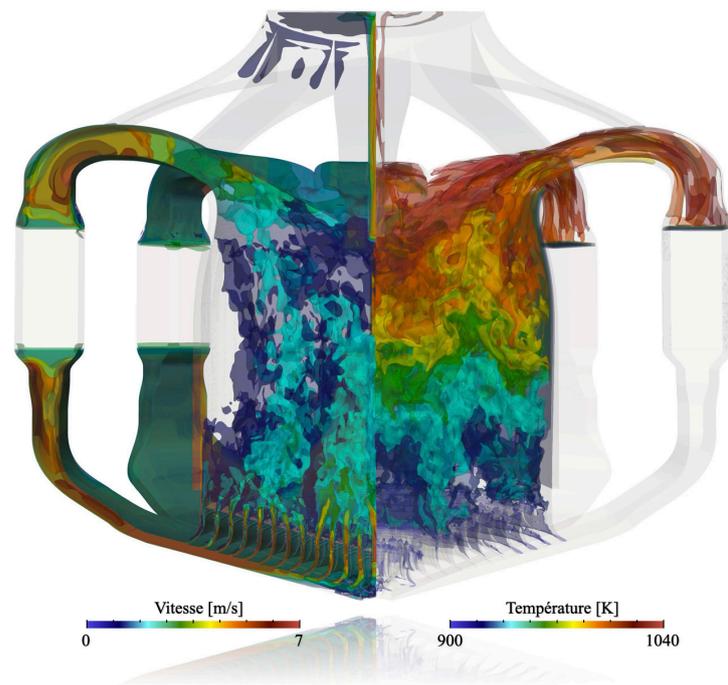


Figure 2 (Crédit : extrait de [2]).

Optimisation du cœur du concept MSFR par des calculs thermohydrauliques de haute-fidélité afin de réduire les fluctuations de puissance induites par la turbulence.

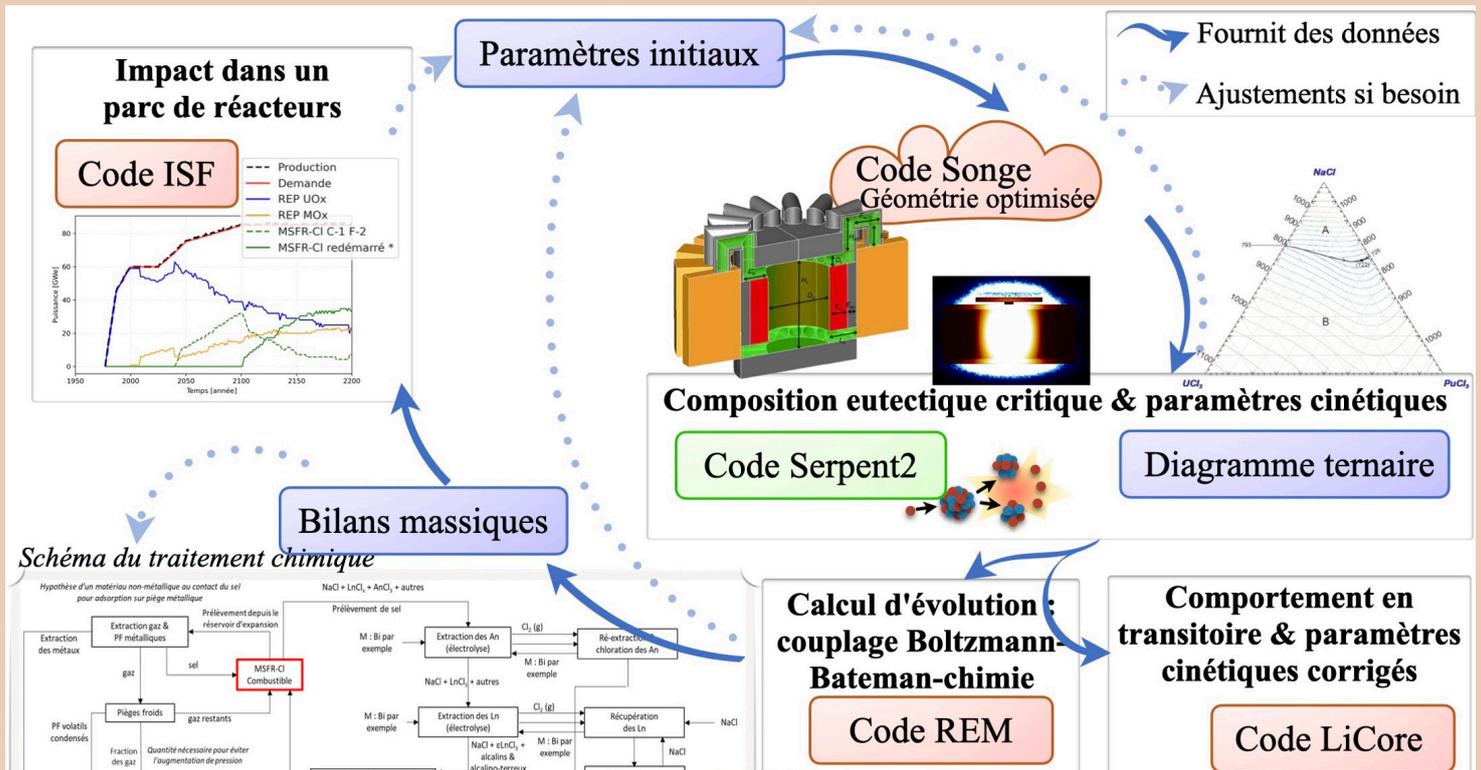


Figure 1 (Crédit : H. Pitois, thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (2023)).

Méthodologie de conception et optimisation d'un réacteur à sels fondus via des études multi-codes, développée par Hugo Pitois lors de sa thèse de doctorat (financée par le projet européen SAMOSAFER) et appliquée à la mise au point des concepts MSFR-CI (régénérateur en sels chlorures et cycle U/Pu) et SyRE (cœur incinérateur à couverture fertile thoriée de 300 MWth pour la transition vers le cycle thorium).

## POUR EN SAVOIR+

### Thèses et HDR

- 'Modélisation d'un scénario d'insertion de réactivité dans un réacteur à sels fondus de génération IV', Thibault Le Meute, collaboration CNRS/LPSC et CEA Cadarache/SESI, novembre 2022 (maintenant ingénieur chercheur IRSN), <https://theses.hal.science/tel-04017775>
- 'Étude de la capacité de conversion des actinides dans un Réacteur à Sels Fondus', Laura Mesthiviers, collaboration CNRS/LPSC et Orano DRD, décembre 2022 (maintenant ingénieure chercheuse au CEA Cadarache) - <https://theses.hal.science/tel-04048655>
- 'Simulation et sûreté du réacteur à sels fondus MSFR dans le cadre du projet européen SAMOSAfer', Hugo Pitois, thèse financée par le projet européen SAMOSAfer, octobre 2023 (maintenant ingénieur chercheur chez NAAREA) - <https://theses.hal.science/tel-04414907>

### Principales publications

1. Chapter 7 - Homogeneous Molten Salt Reactors (MSRs): The Molten Salt Fast Reactor (MSFR) concept, M. Allibert, S. Delpech, D. Gérardin, D. Heuer, A. Laureau, E. Merle, Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, Second Edition, Woodhead Publishing Series in Energy (2023) - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128205884000050>
2. Unmoderated molten salt reactors design optimisation for power stability, A. Laureau, A. Bellè, M. Allibert, D. Heuer, E. Merle, A. Pautz, *Annals of Nuclear Energy*, 177, p. 109265 (2022)
3. Design and optimization of a Chloride Molten Salt Fast Reactor, H. Pitois, D. Heuer, A. Laureau, E. Merle, M. Allibert, *Actes de la conférence internationale ICAPP2023, Gyeongju, Korea (April 2023)*
4. Study on actinide conversion capabilities of Molten Salt Reactors (MSR), L. Mesthiviers, D. Heuer, E. Merle, G. Grassi, B. Morel, G. Senentz, *Actes de l'International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR22: Sustainable Clean Energy for the Future, IAEA, Vienne, Autriche (2022)*
5. New simulation controls for the molten salt reactors related neutronic evolution code REM, L. Clot, E. Merle, A. Laureau, D. Heuer, L. Tillard, G. Senentz, *EPJ Web of Conferences*, p. 05003 (2024)
6. Fast simulation of neutron noise using the Transient Fission Matrix approach and validation on the CROCUS reactor, A. Laureau, M. Begue, V. Lamirand, E. Merle, O. Pakari, *EPJ Web of Conferences*, p. 08002 (2024)
7. Coupled Neutronics and Thermal-Hydraulics Calculations on the Molten Salt Fast Reactor: Identification and Study of Cliff Edge Effects, T. Sornay, T. Boisseau, A. Laureau, A. Lemarchand, E. Merle, F. Vaiana, *Actes de la Conférence Internationale M&C2023, Niagara Falls, Canada (2023)*
8. Modelling of postulated reactivity insertion in a Generation IV Molten Salt Reactor, T. Le Meute, F. Bertrand, N. Seiler, E. Merle, D. Heuer *Actes de l'International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR22: Sustainable Clean Energy for the Future, IAEA, Vienne, Autriche (2022)*
9. Tool Developments in the OpenMC Code: Correlated Sampling and Transient Fission Matrix Approach Coupled to OpenFOAM, A. Laureau, T. Le Meute, T. Ligonnet, E. Merle. *Nuclear Science and Engineering*, p. 1-13 (2024)
10. Considerations on the new safety paradigm provided by liquid-fuelled reactors - Illustration on the MSFR concept, E. Merle, B. Carlucci, M. Allibert, F. Bertrand, T. Boisseau, E. Courtin, D. Heuer, A. Laureau, *Actes du IAEA Technical Meeting on the Safety of High Temperature Gas Cooled Reactors and Molten Salt Reactors, IAEA, Vienne, Autriche (2022)*

### Ressources Web

- <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2024/01/contents/contents.html>, Elsa Merle, Michel Allibert, Daniel Heuer, Axel Laureau, «Des sels fondus pour la 4ème génération de réacteurs nucléaires ?», Reflets de la physique, numéro 77 « Transition énergétique : les défis de la défossilisation », p. 98-103 (Février 2024)
- <https://www.encyclopedie-energie.org/reacteurs-sels-fondus/>
- <https://samosafer.eu/>
- <https://www.mimosa-euratom.eu/>
- <https://www.endurance-msr-project.eu/>

# ÉQUIPE PHYSIQUE DES RÉACTEURS

L'équipe Physique des Réacteurs du LPSC étudie depuis les années 90 plusieurs concepts de réacteurs nucléaires innovants et participent aux mesures des données nucléaires associées. Alliant approches expérimentale et numérique, elle a développé une expertise reconnue, qui lui permet d'étudier aujourd'hui une grande diversité de systèmes nucléaires, à diverses échelles. Son activité se décline actuellement autour de mesures de données nucléaires pour la fission, d'expériences pour validation de modélisations, de modélisation neutronique, d'études multiphysique, de développement d'outils numériques, et d'études technico-économiques pour des scénarios énergétiques.

## **Membres permanents**

Adrien Bidaud, Annick Billebaud, Nicolas Capellan, Sébastien Chabod, Véronique Ghetta, Olivier Méplan (responsable d'équipe), Alexis Nuttin, Mourad Ramdhane, Pablo Rubiolo, Christophe Sage.

## **Membres non permanents**

Davide Portinari (Doctorant), Franco Quinteros (doctorant), Jonas Narvaez (doctorant), Maxime Houdouin-Quenault (doctorant), Kimon Kiramidas (doctorant), Pamela Lopez (doctorante), Daniela Reygadas-tello (doctorante), Juan Blanco (doctorant), Gabin Mantulet (doctorant).

## **Personnels des services techniques**

Maud Baylac, Benjamin Cheymol, Thomas Gemond, Quentin Hars, Etienne Labussière, Christophe Peaucelle, Solenne Rey (Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions), Florent Collovati, Mathieu Da Silva, Olivier Guillaudin, Jean-François Muraz (Service Détecteurs et Instrumentation), Pierre-Olivier Dumont, Marie Giannoni, Julien Giraud, Guillaume Huet, Eric Perbet, Francis Vezzu (Service Etudes et Réalisations Mécaniques), Guillaume Dargaud (Service informatique).

# Activités de modélisation multiphysique numérique et expérimentale (NEXUS)

L'objectif principal de ces activités est de mettre en place des modèles numériques et les expériences multi-physiques (appellation désignant les couplages entre neutronique, thermique, thermo-hydraulique et physique des milieux continus) nécessaires au développement d'applications innovantes concernant les réacteurs ou les systèmes énergétiques nucléaires en général. Le volet expérimental est mené sur la plateforme FEST (Fluids Experiments and Simulations in Temperature) du laboratoire et les outils de simulations multiphysiques reposent sur notre code existant couplant OpenFOAM et SERPENT. OpenFOAM est une librairie C++ permettant le couplage du code neutronique SERPENT avec des solveurs de physique

des milieux continus, à l'aide de méthodes de volumes finis. Les activités de modélisations numériques multi-physiques et expérimentales se sont poursuivies entre 2022 et 2024 dans les axes des études des réacteurs à sels fondus et des réacteurs pour la propulsion nucléaire dans l'espace qui seront décrites ci-après.

## Modélisation des Réacteurs à Sels Fondus (RSFs)

Une partie des activités se sont concentrées sur la modélisation des réacteurs à sels fondus et plus particulièrement sur des problématiques de convection naturelle et de traitement des produits de fissions gazeux. Dans le cadre du projet européen SAMO-SAFER (2019-2023) des études expérimentales et numériques ont été réalisées sur la conception de systèmes de circulation naturelle pour application dans les réacteurs à sels fondus autorisant la possibilité d'une sûreté passive (thèse J. Narvaez en collaboration avec Politecnico de Milano - PoLiMi). Un modèle numérique de ce type d'écoulement en sels fondus et une méthodologie numérique d'analyse de stabilité ont été développés [1] puis implémentés dans le code multiphysique OpenFOAM. Ceux-ci ont permis notamment d'identifier puis de construire une expérience (« Flat cavity experiment ») pour validation basée sur les instabilités thermo-convectives de Rayleigh-Bénard [2]. Des campagnes de mesures des champs de vitesses de type PIV (Particle

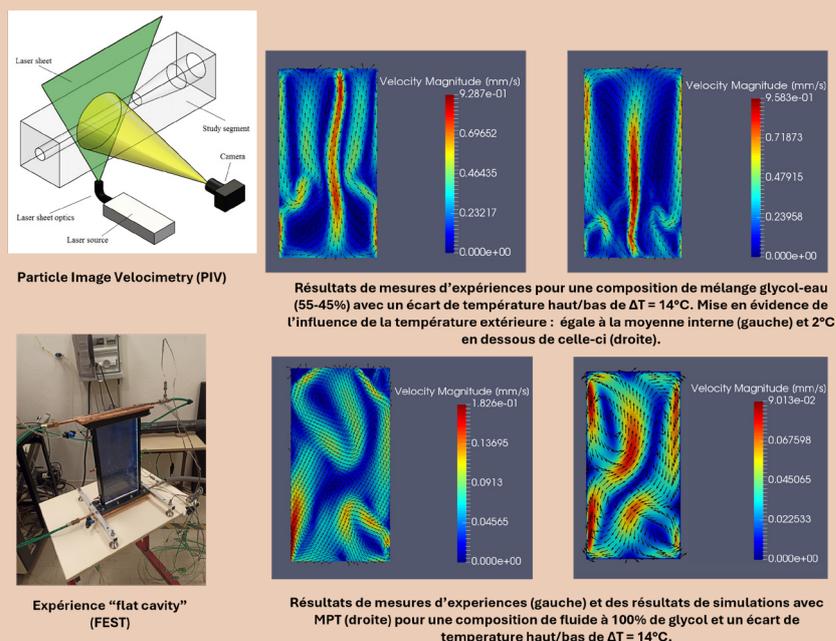


Figure 1 (Crédits : J. Narvaez et J. Giraud, LPSC, CNRS).

Résultats de mesures sur l'expérience "cavité plate" (plateforme FEST) par une méthode PIV et comparaison aux résultats de simulations du code Multi-Physiques MTP (OpenFOAM pour les calculs de CFD (Computational Fluid Dynamics), Matlab pour les analyses de stabilité et des modèles ROM (Reduced Order Modeling) développés en collaboration avec PoliMi). Un écart de température entre la partie supérieure et inférieure de la cavité est appliqué : s'en suivent la mise en place de cellules de convections naturelles.

Image Velocimetry) ont été réalisées pour différents nombres de Rayleigh et comparés aux simulations. Ces études seront poursuivies en collaboration avec PoLiMi dans le cadre du nouveau projet européen ENDURANCE (2024-2028). En parallèle, dans le cadre du projet ISAC (2022-2026) du plan France Relance, des nouveaux modèles multi-physiques de production, transport et séparation des produits de fission gazeux en réacteurs à sels fondus ont été développés et implémentés dans notre outil multiphysique NEPFoam (thèse M. Marone). L'objectif est d'étudier la faisabilité d'un dispositif qui éliminerait du circuit combustible des Molten Salt Reactors (MSR) les produits de fission gazeux avant leur décroissance en les capturant à l'aide d'un gaz neutre injecté dans le réacteur, puis en les extrayant [3]. Ceci permettrait notamment une réduction des problèmes de corrosion de ces réacteurs. Deux boucles en convection forcée, l'une en eau et l'autre en sels chlorures, ont été construites pour tester les modélisations et la validité des modèles. Les campagnes de mesures ont été réalisées en collaboration avec le LEGI (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels de Grenoble).

### **Conception et modélisation des réacteurs pour la propulsion nucléaire dans l'espace**

Dans la suite des développements entrepris depuis

2018, les études de conception et de modélisation des réacteurs pour la propulsion nucléaire électrique (NEP) dans l'espace se sont poursuivies dans le cadre du projet européen CNRS-RocketRoll financé par l'ESA et d'une collaboration avec le CNES autour d'une thèse en cotutelle. L'objectif principal du projet CNRS-RocketRoll est de définir une feuille de route pour le développement de la propulsion nucléaire électrique en Europe [4]. Le projet a permis de développer une nouvelle méthodologie de conception [5] ainsi que deux concepts de réacteurs spatiaux [6]. Par ailleurs, s'appuyant sur les modèles numériques préalablement implémentés dans l'outil MTP NEPFoam, un code numérique PRESTO (NEP rocket design tool) est en cours de développement (thèse F. Szmandiuk en collaboration avec le CNES). Son objectif est d'évaluer et d'optimiser les différentes combinaisons possibles d'un réacteur NEP, modélisant l'ensemble du dispositif : du réacteur nucléaire au système de propulsion en passant par le blindage, les convertisseurs électriques et les radiateurs. Toujours dans le souci de confronter les simulations aux expériences, le dispositif expérimental MARGUERITE (Molten sAlt for eneRGy and nUclear spacE pRopulsion research and Teaching Experiment) a été réalisé. Il permettra de valider les modélisations concernant les technologies de caloduc (heat pipe) et de convertisseurs thermoélectriques. Ce dispositif sera aussi utilisé dans le cadre des TPs des formations de Phelma / Grenoble-INP.

## **Physique des réacteurs sous-critiques**

En 2021, dans le cadre de l'appel à projets France 2030/ BPI France « Solutions innovantes pour la gestion des matières et déchets radioactifs, et la recherche d'alternatives au stockage géologique profond », notre équipe et l'équipe aval du cycle du LPC Caen ont déposé un projet destiné à poursuivre les travaux qu'elles mènent ensemble depuis plus de 15 ans sur le monitoring de la réactivité d'un ADS (Accelerator Driven System - réacteur sous-critique rapide piloté par accélérateur). Ce projet, appelé SPATIAL (Système Piloté par Accélérateur pour la Transmutation et la réduction des stockAges géoLogiques) s'est vu attribuer

un financement conséquent et a débuté en novembre 2022. Il vise à mettre au point une méthode fiable de mesure de la réactivité au cours d'interruptions brèves de la source, en quantifiant le plus précisément possible les biais et incertitudes qui impacteront la mesure de réactivité d'un ADS de puissance au cours de son cycle d'utilisation et ce, en fonction du choix du détecteur. Cela permettra de minimiser le besoin d'une marge à la criticité supplémentaire qu'induirait une mesure de réactivité entachée d'une grande incertitude. En effet, au premier ordre le flux neutronique, et donc la puissance d'un ADS, est proportionnelle à l'intensité de la source externe de neutrons fournie par l'accélérateur couplé à la cible de spallation, et inversement proportionnelle à la réactivité du cœur. En conséquence, la marge supplémentaire de réactivité due aux incertitudes et biais de la mesure de réactivité a un impact direct sur la puissance de l'ADS (ou l'intensité du faisceau), et donc sur ses capacités finales de transmutation.

Afin de remplir ces objectifs, le projet SPATIAL consiste à :

- Étudier très précisément les effets spatio-énergétiques qui perturbent la mesure de réactivité lors d'interruptions de faisceau en réalisant une cartographie en espace et en énergie systématique de ces effets et de leur dépendance temporelle en différents points d'une maquette d'ADS (puissance presque nulle) piloté par une source externe de neutrons ;
- Transposer les résultats précédents à un ADS de puissance chargé en Actinides Mineurs (étude numérique), afin de quantifier les biais et les incertitudes sur la mesure de réactivité tout au long de l'exploitation d'un l'ADS.

La réalisation de la première étape s'appuie sur une observable très sensible au spectre en énergie tout en donnant la possibilité de séparer les effets énergétiques des effets spatiaux, l'indice de spectre (rapport des taux de fission de deux nucléides différents), qui pourra être mesuré à l'aide de chambres à fission contenant différents dépôts, le long d'une traverse du réacteur sous-critique afin de cartographier les effets spatio-énergétiques à l'œuvre dans l'ensemble du réacteur en fonction de l'espace et du temps dans quelques configurations soigneusement choisies. Elle nécessite que la maquette d'ADS soit pilotée par une source externe de neutrons de haute intensité et de haute fiabilité, afin d'atteindre des statistiques exploitables sur des temps maîtrisables. Ces mesures

seront réalisées dans la maquette GUINEVERE, qui consiste en le couplage du réacteur belge VENUS-F (SCK CEN) avec la source de neutrons pilotée par accélérateur GENEPI-3C, issue de nos laboratoires (construite de 2007 à 2009 par une collaboration IN2P3). Pour atteindre les performances souhaitées, l'accélérateur GENEPI-3C doit faire l'objet d'un important travail d'extension de performances, qui implique une nouvelle source d'ions, l'implantation d'un hacheur de faisceau, de nouveaux diagnostics et un accroissement important de la capacité de refroidissement de la cible conduisant à une refonte complète du système cible/fluide. Ces travaux sont menés par le Pôle Accélérateurs et Source d'Ions du LPSC, avec le support des services techniques du laboratoire, en particulier le Service Etudes et Réalisations Mécaniques, ainsi que par le Service Mécanique du LPC Caen qui assure la coordination mécanique de l'ensemble.

Au cours des deux premières années de ce projet (2022-2024) les travaux ont principalement porté sur la consolidation du cahier des charges de la source de neutrons et l'étude complète des configurations de mesure (schémas de cœur, choix des détecteurs, estimations des taux de comptage), partie essentiellement menée au LPC Caen, tandis qu'au LPSC le travail s'est concentré sur la mise en place de la partie technique du projet (organisation/documentation projet, recrutement des CDD techniques) et le démarrage des différentes tâches techniques dédiée à l'upgrade de l'accélérateur.

## Réacteurs à eau et haute conversion : étude de la sûreté et de méthodes de Spectral Shift

Mise au point sur un benchmark de l'expérience KRUSTY du LANL (démonstration d'un cœur rapide dédié à la production d'électricité pour le spatial), la méthode généralisée sNDM (Nodal Drift Method) [7] de calcul de transitoires basée sur l'approximation de la diffusion a ensuite été appliquée à

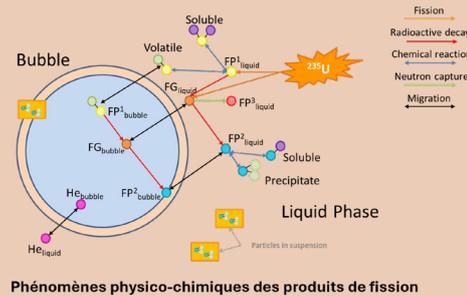
l'étude de la sûreté de petits cœurs thoriés et refroidis à l'eau lourde. Basés sur la technologie bien connue des réacteurs REP existants, ces cœurs cherchent (au même titre que les concepts bien plus innovants dits de 4<sup>e</sup> génération) à optimiser la conversion de la part fertile du combustible (Th-232) en fissile (U-233). En remplaçant l'eau légère par l'eau lourde, le spectre neutronique est considérablement durci (ce qui en soit est déjà favorable à cette conversion). Mais cela nécessite en outre de gérer la réactivité au cours du cycle autrement que par bore soluble (constituant en début de cycle une réserve de réactivité qu'on libère progressivement en diluant ce poison neutronique, bien moins efficace en spectre rapide). On remplace donc la gestion par réserve de réactivité par une méthode dite de Variation de Spectre, consistant à maintenir la criticité en ajoutant un peu d'eau légère de temps en temps et améliorant ainsi grandement la conversion.

Les derniers calculs effectués sur ce type de cœurs



Boucle de convection forcée en eau (ISAC)

Boucle de convection forcée en sels (ISAC)



Phénomènes physico-chimiques des produits de fission

Figure 2 (Crédits : M. Marone et J. Giraud, LPSC, CNRS).

Boucles d'essais et de validations pour les modèles développés dans l'outil multi-physiques MTP/NEPfoam. Ces expériences complémentaires en eau et en sel permettent de contraindre les modèles utilisés dans MTP/NEPfoam et de les valider. La migration des gaz en écoulement diphasique a pu être mesurée sur la boucle en eau et reproduite par simulation. Les mesures et études se poursuivront sur la boucle en sel qui sera pleinement opérationnelle en 2025.

ont confirmé non seulement leurs performances très intéressantes de conversion (proches de la régénération du fissile lorsqu'ils sont assez sous-moderés) mais aussi de sûreté (à l'aide de calculs simplifiés rendus possible grâce à la méthode sNDM et un découpage azimuthal de chaque cœur pour les nœuds du calcul en cinétique spatiale d'une éjection de grappe). Mais un inconvénient de cette méthode de Variation de Spectre, par ajout progressif d'eau légère dans le caloporteur eau lourde, est justement de devoir reconcentrer l'eau lourde d'un cycle à l'autre, ce qui

représente un surcoût contre lequel on cherche une alternative. Une solution, qui vient d'être testée avec succès dans le cadre d'un stage de PFE, consiste à insérer des grappes de crayons non pas absorbants (usuellement en  $B_4C$ ) mais modérateurs (en  $ZrH_2$ ) i.e. ralentissant les neutrons (en lieu et place de l'eau légère introduite dans le caloporteur par la méthode précédente). D'autres combustibles ont également été étudiés, de type Th/Pu (pour la transition au cycle Th/U) ou HALEU (uranium enrichi).

## Conception algorithmique d'équipements nucléaires

Dans le cadre d'un projet IRSN-CNRS, l'équipe a calculé la structure d'un modérateur épithermique de référence métrologique, à installer sur l'installation T400 à Cadarache. Pour ses missions, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) souhaite se doter d'une source de neutrons épithermiques intense et pure, qui sera obtenue en couplant l'accélérateur d-d T400 avec un modérateur. Ce modérateur devra ralentir les neutrons de 3 MeV générés par le T400 jusqu'à la gamme 0.5 eV – 10 keV souhaitée pour les acquisitions. Les contraintes de design de ce futur modérateur sont cependant nombreuses : (i) en raison de limitations structurelles inhérentes à la plateforme expérimentale (résistance des supports, capacité du pont roulant, etc.), le

modérateur ne devra pas peser plus de 3,5 t et dépasser 70 cm en rayon et 130 cm en longueur ; (ii) le champ épithermique généré par le modérateur devra être suffisamment intense pour déposer, sur un dosimètre positionné à grande distance, une dose  $> 1$  mSv en 6 h de fonctionnement ; (iii) le champ épithermique en sortie du modérateur devra être aussi propre que possible : sa contamination thermique ( $E < 0.5$  eV) et rapide ( $E > 10$  keV) ne devra pas excéder quelques pourcents de la dose déposée ; (iv) pour des raisons budgétaires, l'utilisation de céramiques fluorées, e.g.  $AlF_3$  ou  $MgF_2$ , coûteuses mais connues pour leur capacité à épithermaliser les neutrons dans un volume compact, sera impossible. Pour résoudre ce problème d'optimisation sous contraintes complexe, l'équipe a utilisé un algorithme d'optimisation topologique, développé en interne, capable de calculer la meilleure structure possible d'un dispositif nucléaire [8]. Appliqué au problème du design du modérateur T400, cet algorithme a généré une solution non intuitive constituée d'un anneau d'aluminium incorporé dans une matrice en téflon, fermée par une plaque de titane. Cette structure innovante vérifie avec une marge confortable les contraintes de design [8]. Ses plans ont été transmis à l'IRSN.

## Mesures de Données Nucléaires

Ces dernières années, l'impact des rendements de fission dans la propagation d'incertitude de grandeurs neutroniques (puissance résiduelle, perte de réactivité, débit équivalent de dose ...) est devenu central. Cela s'explique par deux facteurs. D'une part par une amélioration des codes de transport des neutrons, dont les performances sont désormais limitées par les données d'entrée, dont les rendements de fission. D'autre part par des évaluations vieillissantes dont la non complétude (matrice de covariance) est un facteur limitant lors de leur utilisation.

Depuis la fin des années 2000, une collaboration entre le CEA, le LPSC et l'ILL (Institut Laue Langevin) a pour ambition de revisiter la mesure des rendements en masse des noyaux importants pour le cycle du combustible (présent et futur). Le but est à la fois de fournir des covariances expérimentales, indispensable à la construction d'évaluations complètes et précises, mais aussi de fournir de nouveaux jeux

de données cruciaux pour contraindre les modèles théoriques décrivant la dynamique du processus de fission. A cette fin, l'équipe se focalise notamment sur la mesure de rendements dans la région de la fission symétrique, constituant un vrai défi technologique, mais qui revêt un intérêt crucial pour les modèles de fission. En effet dans cette région très peu mesurée, les rendements en fission thermique sont plusieurs ordres de grandeur inférieurs à ceux des principales masses produites, et sont donc extrêmement difficiles à extraire de ces masses principales.

Le programme de développement d'une ligne de temps de vol (ToF) [9] en complément du spectromètre Lohengrin de l'ILL a été initié en 2020. L'objectif est de développer et valider un double détecteur (start et stop) qui sera couplé avec la chambre à ionisation (déjà existante) placée à la sortie du canal LOHENGRIN. Les produits de fission sélectionnés par le spectromètre seront alors caractérisés par trois signaux :  $\Delta E$ , E, TOF.  $\Delta E$  et E sont fournis par la chambre à ionisation et TOF sera fourni par le futur temps de vol. A l'aide de ces trois signaux, il deviendra possible d'identifier sans ambiguïté les contaminants qui biaisent les mesures de rendements de fission dans la zone de masses symétriques.

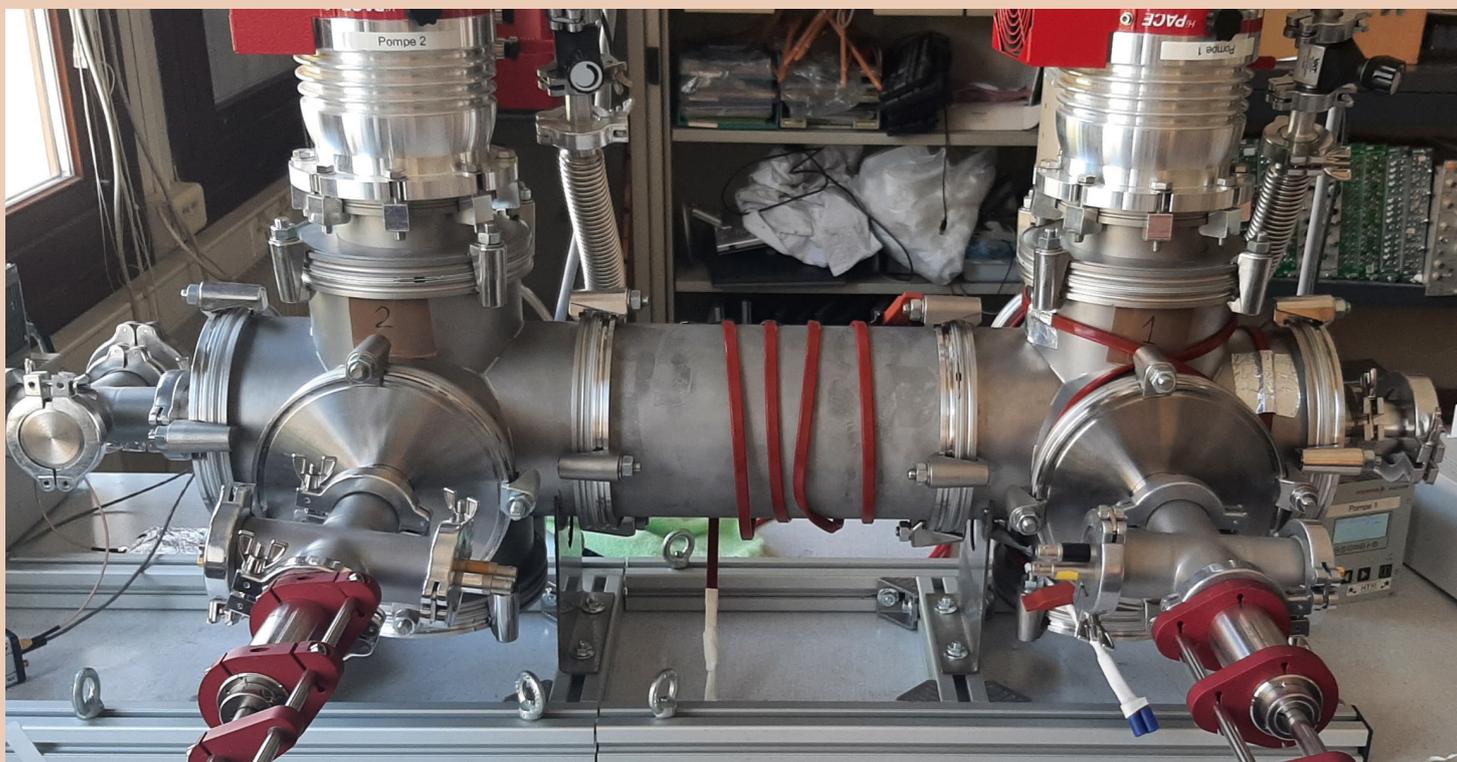


Figure 3 (Crédit : M. Viéville, LPSC, CNRS).

Prototype de la ligne de Temps de Vol installé au LPSC Grenoble. Cette dernière sera couplée au spectromètre LOHENGRIN de l'ILL afin de réaliser des mesures de précision de rendements dans la région de la fission symétrique.

Après plusieurs essais comparatifs, il a été décidé d'utiliser la technologie MCP (Multi Channel Plate) pour la détection des électrons émis à chaque étage start et stop. Ces détecteurs ont pu être assemblés et testés courant 2023 sur un banc de test au LPSC (figure 1), où une résolution temporelle satisfaisante autour de 114 ps fut mesurée (figure 2) pour chacun. Cette mesure a été obtenue en réalisant une coïncidence entre les détecteurs MCP et un détecteur diamant.

Une première campagne a eu lieu à l'ILL début décembre 2023 afin de tester le couplage de la ligne

de temps de vol sur le spectromètre Lohengrin. Les tests mécaniques (support de la ligne, vide secondaire effectif) furent concluants, mais la résolution temporelle obtenue avec les produits de fission fut jugée non satisfaisante, du fait d'un important effet de straggling lors de la traversée de ces derniers au sein des positions start et stop de la ligne de ToF. Une adaptation de géométrie est donc nécessaire afin de pallier ce problème. Des études réalisées avec le logiciel Comsol (figure 2) ont été réalisées courant 2024 afin de définir les éléments d'une nouvelle géométrie minimisant cet effet.

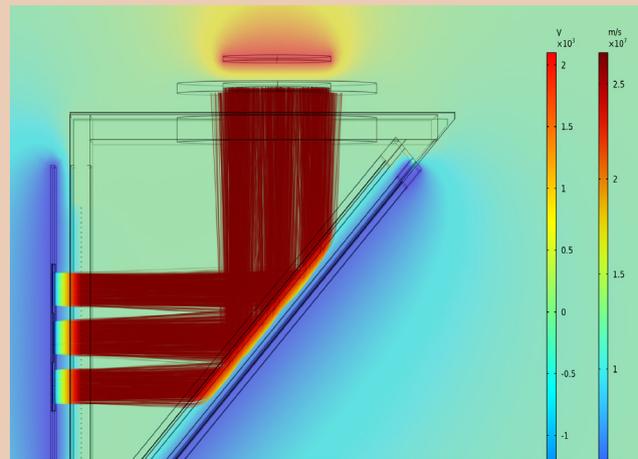
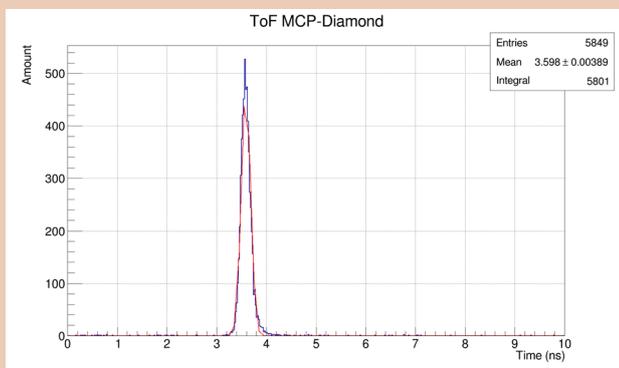


Figure 4 (Crédit : M. Viéville, LPSC, CNRS).

Résolution temporelle du ToF mesurée en coïncidence MCP/détecteur diamant avec une source de particules alpha autour de 114 ps sur le banc de test au LPSC. (à droite) Exemple de simulation des trajectoires des électrons au sein d'un des deux cubes du prototype réalisée avec le logiciel Comsol.

## Sensibilités et incertitudes

Une collaboration du LPSC avec l'ILL et Technicatome a permis de mettre au point un outil de calcul de sensibilités aux données nucléaires de l'évolution d'un combustible nucléaire, basé sur des calculs Monte Carlo effectués avec le code Serpent2. Ces travaux prennent désormais en compte des couplages complexes. Par exemple, la constance de la puissance extraite du combustible, imposée dans la réalité, génère des dépendances complexes des sensibilités calculées à certains poisons neutroniques, jusqu'ici rarement prises en compte. Les contributions des différents effets sont d'intensités très variables, et parfois de signes opposés, ce qui rend l'impact des

différentes réactions difficiles à interpréter sans les outils développés. Ces outils ont été appliqués au cas particulier du combustible moyennement enrichi envisagé pour le futur du réacteur à haut flux de l'ILL.

Nous avons montré dans le cadre de la thèse de P. Lopez que le calcul des sensibilités Monte Carlo de la distribution de puissance d'un grand cœur, similaire à celui d'un EPR, avait des problèmes de convergence, non-triviaux. Les codes de transport Monte Carlo sont des outils de références en neutronique mais ils ne disposent de capacités de calculs de sensibilité correctes que depuis une décennie environ. Celles disponibles dans le code Serpent 2 sont basées sur un apport majeur d'un ancien post-doctorant de l'équipe. Les vitesses de convergence et les paramètres les impactant sont donc encore mal connus. Dans son travail de thèse soutenue par NEEDS et avec le soutien de stagiaires, M. Rababah a identifié les paramètres clés impactant la convergence des calculs de sensibilités,

et leurs incertitudes statistiques, et les a reliés à des caractéristiques neutroniques et géométriques du calcul à mener. Ces problèmes de convergence sont graves, puisque l'utilisateur peut indûment croire que ses calculs de sensibilités sont fiables, alors que ce n'est

pas le cas. M. Rababah propose une méthode robuste qui permet aux utilisateurs de minimiser le temps de calcul et d'avoir une bonne confiance dans les valeurs calculées et leurs incertitudes.

---

## Prospective Énergétique

La thèse de K. Keramidas a permis une refonte complète de la modélisation des productions d'acier et de ciment dans l'outil de prospective énergétique de long terme POLES (Prospective Outlook on Long-term Energy Systems). Chacun faisant près de 7 % des émissions mondiales, leur décarbonation est un

point crucial des scénarios types 1,5 °C, compatibles avec les objectifs de l'accord de Paris. C'est un travail unique et difficile mais très intéressant du fait de la complexité du couplage de la demande avec l'évolution de nombreux autres secteurs comme le bâtiment, ainsi qu'avec les sources de matières recyclables (pour l'acier), et surtout avec les sources et les vecteurs d'énergies décarbonées (biomasse, hydrogène, électricité) qui peuvent se substituer aux énergies fossiles dans les procédés, ainsi qu'avec le potentiel de capture-séquestration de CO<sup>2</sup> envisageable pour capter les émissions des procédés eux-mêmes émetteurs indépendamment de l'énergie.

## POUR EN SAVOIR+

### Thèses et HDR

- “Design of a Nuclear reactor for space electric propulsion”, Franco QUINTEROS, IN2P3, 29/06/2023, <https://theses.fr/2023GRALI048>
- “Numerical and experimental study of the dynamic behavior of natural circulation systems using molten salts for heat removal”, Jonás Narváez Arrúa, GINP et POLIMI, 29/11/2024.

### Principales publications

1. “Numerical methodology for design and evaluation of natural circulation systems for MSR applications”, J. Narvaez, A. Cammi, S. Lorenzi, P. Rubiolo, International Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics 2022 (ATH'22), Anaheim, USA, June 2022, <http://dx.doi.org/10.13182/T126-38351>
2. “Design of a Natural Circulation Experiment to Investigate Flow Stability”, J. Narvaez, P. Rubiolo, A. Cammi, S. Lorenzi, 20th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-20), Washington, USA, August 2023, <https://www.ans.org/pubs/proceedings/article-54328/>
3. “Development of a Gaseous Fission Products’ Model for a Molten Salt Reactor (MSR): Analysis of the Effect of the Gas Removal System’s Efficiency on the Concentration of Xenon in the Fuel Circuitry”, M. Marone, P. Rubiolo, V. Ghetta, J. Giraud, F. Quinteros, International Conference on Physics of Reactors (Physor 2024), San Francisco, USA, April 21-24, 2024, <https://www.ans.org/pubs/proceedings/article-55674/>
4. “Assessment of Nuclear Electric Propulsion (NEP) Concepts and Development of a NEP Roadmap for Europe”, P. Rubiolo, N. Capellan, S. Lorenzi, R. Boccelli, A. D’Ottavio, A. Peressotti, F. Romei, A. Cuenca, A. Sauvage, A. Barco, A. Hein, A. Abdin, Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS 2024), Santa Fe, USA, May 6-10, 2024, <https://www.ans.org/pubs/proceedings/article-55743/>
5. “A Comprehensive Methodology for Designing a Nuclear Electric Propulsion (NEP) Concept”, P. Rubiolo, N. Capellan, S. Lorenzi, R. Boccelli, A. D’Ottavio, A. Peressotti, F. Romei, A. Cuenca, A. Barco, A. Herasimenka, A. Abdin, A. Hein, 75th International Astronautical Congress (IAC), Milan, Italy, 14-18 October 2024, (2024), <https://iafastro.directory/iac/paper/id/88438/summary/>
6. Design of a Fast Molten Salt Reactor for Space Nuclear Electric Propulsion, F. Quinteros, P. Rubiolo, V. Ghetta, J. Giraud, N. Capellan (2023), Nuclear Science and Engineering, <https://doi.org/10.1080/00295639.2023.2167470>
7. Bold application of the sNDM diffusion method to REA in a D2O/H2O-cooled thorium-fueled SMR core with azimuthal mesh, A. Nuttin, N. Capellan, O. Méplán, 2024. Prog. Nucl. Energy 175, article 105344, <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105344>
8. “Multi-material topology optimization of nuclear devices – principle and application”, S. Chabod, D. Santos, N. Sauzet, EPJ Web of Conferences 302, 15004 (2024), <https://doi.org/10.1051/epjconf/202430215004>
9. “New measurement of the  $^{235}\text{U}$ (nth,f) fission yields and development of a Time of Flight line at the LOHENGRIN spectrometer”, M. Houdouin-Quenault et al., EPJ Web of Conf. 284, 04003 (2023), <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328404003>

### Ressource Web

- Plateforme FEST : [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=1327](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=1327)

# ÉQUIPE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET APPLICATIONS MÉDICALES

L'équipe Physique Nucléaire et Applications Médicales (PNAM) a des activités de recherche en physique autour des radiothérapies (RT) innovantes, en instrumentation détecteur (monitorage, détecteur de particules secondaires en thérapie par faisceaux d'ions) et en modélisation dans le cadre des radiothérapies ciblées (étude de la dose physique déposée par les ions à faible parcours pour la prédiction d'effets biologiques associés). Ces travaux s'inscrivent dans un contexte collaboratif local, en s'appuyant sur les infrastructures expérimentales telles que l'Institut Néel, l'ESRF ou l'ILL, le CHU de Grenoble CHUGA, l'IAB et l'INSERM. À l'échelle régionale, PNAM est membre du LabEx PRIMES. Nationalement, les activités de l'équipe sont fédérées par le GDR MI2B. Par ailleurs, PNAM s'investit en physique des détecteurs (conception de détecteurs diamant innovants) et en physique théorique (structure nucléaire).

## **Membres permanents**

Yannick Arnoud, Denis Dauvergne, Rachel Delorme, Marie-Laure Gallin-Martel (responsable équipe), Sara Marcatili, Olivier Rossetto, Gabriela Thiamova.

## **Membres non permanents**

Adélie André, Pierre Everaere, Maxime Jacquet, Claire Léonhart, Victor Levrague, Candice Milewski, Robin Molle, Alexandre Portier, Sarah Otmani (doctorants), Francesca Di Franco, Pavel Kavrigin, Jayde Livingstone, Maria Pedrosa Rivera, Maxime Pinson (postdoctorants).

## **Personnels des services techniques**

Jean-Luc Bouly, Laurent Gallin-Martel, Christophe Hoarau, Eric Lagorio, Pierre Paris, Nicolas Ponchant, Fatah Rarbi, Jonathan Waquet, Mahfoud Yamouni (Service Électronique), Olivier Guillaudin, Abdelkader Mohammed-Matallah, Marc Marton, Jean-François Muraz, Melvyn Reynaud (Service Détecteur et Instrumentation).

# Monitoring faisceaux par détecteurs diamant pour la radiothérapie FLASH, les microfaisceaux ou l'hadronthérapie

Les radiothérapies (RT) innovantes visent à améliorer la réponse thérapeutique à certains cancers radio-résistants, en augmentant l'efficacité sur le contrôle tumoral ou en diminuant la toxicité aux tissus sains environnants. On peut par exemple jouer sur la balistique du faisceau (pic de Bragg en hadronthérapie) ou sur le mode de délivrance de dose (RT FLASH et microfaisceaux). Pour les RT dites externes, la bonne délivrance des traitements repose sur le monitoring des faisceaux de particules incidentes et le contrôle en ligne du dépôt de dose. Dans ce contexte, l'équipe s'est investie dans une R&D en technologie diamant (master projet DIAMANT à l'IN2P3: LPSC (porteur), IJClab, LP2I, SUBATECH en collaboration avec le GIP ARRONAX, l'Institut Néel et l'IRSN). Le diamant est un matériau semi-conducteur à grand gap, résistant aux irradiations, rapide et à bas bruit. Il est utilisé comme une chambre d'ionisation solide et forme un détecteur compact qui interface le faisceau, introduisant une atténuation homogène.

La RT par faisceaux d'ions, ou hadronthérapie nécessite une surveillance très précise (liée à la balistique) du faisceau d'ions (proton ou carbone), en amont du patient, avec un comptage rapide dans un environnement fortement radiatif. En effet, la localisation du dépôt de dose est basée pour cette RT sur la détection de rayonnements secondaires (gamma prompts) émis sur le trajet de l'ion dans le patient. Dans un objectif de synchronisation de leur détection avec la délivrance faisceau (réduction des bruits de fond), il s'avère crucial d'étiqueter spatialement et temporellement chaque impulsion du faisceau, voire chaque ion incident, à l'aide d'un moniteur. Ainsi, un hodoscope diamant (thèse P. Everare 2020 - 2023) a été développé. Son volume actif est segmenté par

pistes de directions orthogonales (profil en 2D) sur les faces entrante (X) et sortante (Y) par rapport à l'axe du faisceau (Z). Il est lu par une chaîne d'électronique discrète dédiée (préamplificateur courant tension, discriminateur à fraction constante). Le taux de comptage est de 100 MHz pour l'ensemble du détecteur (soit ~10 MHz par voie) avec une résolution temporelle de 70 ps rms (au proton unique) et une résolution spatiale de 1 mm (segmentation en pistes).

La RT FLASH proton repose sur l'utilisation répétée de faisceaux très intenses et brefs (segmentation temporelle de la dose) ce qui permet aux tissus sains de supporter des doses curatives supérieures à celles délivrées par des irradiations conventionnelles et de limiter à une séance unique les traitements. Les débits de dose (~100 Gy/s) sont plus élevés de plusieurs ordres de grandeurs qu'en mode conventionnel (~1 Gy/mn). Ainsi, le détecteur DIAMMONI (ANR DIAMMONI, thèse Robin Molle 2021 - 2024) fonctionne sur une large dynamique (>100 protons par impulsion de 4 ns à 30 MHz jusqu'à des flux de  $10^{13}$  p/cm<sup>2</sup>/s), opère un marquage en temps (début et fin) des trains d'impulsions et mesure la charge délivrée sans perte de linéarité et sans dégradation de ses performances jusqu'à des fluences de  $10^{13}$  p/cm<sup>2</sup> [1].

La RT par microfaisceaux (MRT) a été développée sur la ligne médicale ID17 de l'ESRF-Grenoble. Elle utilise des faisceaux de rayons X très intenses (~ $10^4$  Gy/s) d'énergie comprise entre 50 et 200 keV et repose sur un mode de délivrance de dose par fractionnement spatial et haut débit. Ce mode implique une irradiation hétérogène des tissus, avec des « pics » de très forte dose dans la trace des faisceaux (< 50 µm) et des zones de faible dose (« vallées ») entre ces faisceaux, ce qui permet aux tissus sains de supporter des doses curatives supérieures aux irradiations homogènes. Grâce à la très faible divergence du faisceau synchrotron, le fractionnement spatial peut-être conservé sur toute la traversée du patient et contrôlé en aval (imageur portal). Un détecteur adapté doit être rapide, supporter une forte dynamique, être insensible à l'échauffement sous irradiation X intense, et avoir une composition proche des tissus biologiques. Le diamant répond intrinsèquement à ces exigences. Dans le cadre des projets R&T DIAMTECH puis du master projet DIAMANT à l'IN2P3 et des projets INCA PCSI MRT Clintra (2022 – 2024) puis IODA MASTER (2023 – 2026), le détecteur IDSYNCHRO (figure 1) a été conçu. Il se compose de 9 diamants disposés sous forme d'une barrette (matrice 1D) et segmentés avec un pas de piste (17 pistes par diamant) adapté à la taille des faisceaux

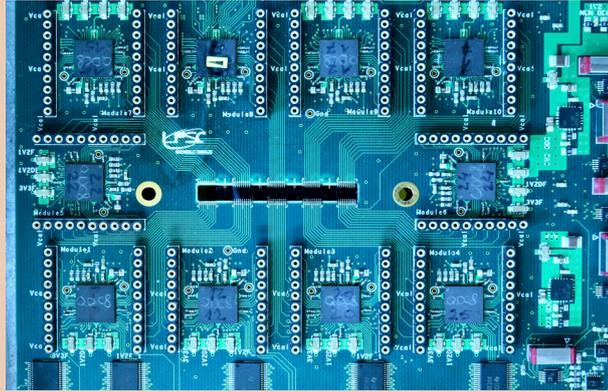


Figure 1 (Crédit J.F. Muraz, LPSC, CNRS).

Le détecteur IDSYNCHRO (153 pistes).

(pics et vallées en termes de maxima et minima de doses). L'électronique de lecture se fait par intégration de courant. Ce détecteur à l'échelle 1 (153 voies) a été validé sur ID17 (postdoc Francesca Di Franco [2]). Après fermeture de la ligne en juillet 2023, les tests se sont poursuivis (thèse de Candice Milewski) sur le synchrotron de Melbourne. La conception d'un détecteur similaire, mais placé en amont du patient, est actuellement en cours au LPSC pour permettre d'assurer un suivi dosimétrique de transit complet.

En marge des développements de ces RT externes innovantes, les activités de radiobiologie sur micro-faisceaux dans le cadre du traitement du cancer s'inscrivent dans l'optique de mesurer les effets

physico-chimiques précoces associés à l'irradiation des tissus, avec un contrôle balistique à l'échelle du micromètre. C'est dans ce contexte qu'a été développé le détecteur diamant DéFI DiaMS (MITI 80 PRIMES, thèse Claire Léonhart 2023 - 2025). Les détecteurs actuellement en développement (fenêtre d'extraction active de l'accélérateur) doivent permettre de connaître, avec précision, le nombre d'ions délivrés sur chaque cellule exposée. L'objectif majeur est de concevoir des détecteurs de volume actif ultra mince ( $\leq 1 \mu\text{m}$  en épaisseur) par des techniques novatrices de gravure afin de permettre de monitorer (transparence) des microfaisceaux d'ions carbone (8 MeV/u) mais aussi de protons (1.5 MeV).

## Détection de particules secondaires, les gamma prompts, en thérapie par faisceaux d'ions

L'hadronthérapie emploie des ions (proton, carbone) pour traiter les tumeurs. La distance de pénétration dans les tissus est liée à l'énergie initiale des ions et à la densité des tissus traversés. Ces faisceaux ont une balistique de dépôt de dose très précise en raison de leur parcours fini, avec un maximum au pic de Bragg. Au sein de l'équipe, deux collaborations, CLaRyS et TIARA, ont mis en œuvre

deux approches complémentaires pour procéder au contrôle en ligne de la bonne délivrance de dose au volume tumoral. Elles sont basées sur la détection de particules secondaires : les gamma prompts (GP).

### **Collaboration CLaRyS S2C2**

La collaboration CLaRyS (Contrôle en Ligne de l'hadronthérapie par Rayonnements Secondaires) regroupe des équipes de l'IP2I, du LPSC, et de CREATIS. A la suite du projet INCa-PCSI CLaRyS-UFT qui s'est achevé en 2021, une étude sur la tomographie par faisceau de protons utilisant la mesure de temps de vol a été publiée en 2022 [3]. Cette étude, basée sur des simulations avec le code Monte Carlo GATE, a permis d'étudier l'impact à la fois de la dispersion en énergie (straggling) dans un volume de grande épaisseur, et la résolution temporelle d'un télescope à temps de vol mesurant l'énergie résiduelle.

Dans le cadre de la thèse de Pierre Everaere, l'hodoscope faisceau diamant a été testé sous faisceaux de protons avec son électronique frontale. La résolution

temporelle mesurée à l'aide d'une numérisation analogique-digitale par un circuit FPGA est de l'ordre de 70 ps rms pour un dépôt d'énergie de 1,6 MeV, ce qui est conforme au cahier des charges. L'étape suivante consiste à instrumenter l'ensemble des voies de lecture et de fournir l'étiquetage spatio-temporel de chaque ion incident (ou paquet d'ions dans le cas de faisceaux pulsés) à l'intensité clinique.

La problématique du contrôle en ligne de la protonthérapie sur faisceaux délivrés par un synchro-cyclotron est très spécifique, car elle fait intervenir des faisceaux pulsés à faible cycle utile (quelques pourcents) mais à forte intensité instantanée dans une micro impulsion (de l'ordre du micro-ampère pendant une dizaine de microsecondes). En collaboration avec le CAL-Nice, nous avons proposé une méthode d'intégration de l'énergie totale déposée dans un petit nombre de

détecteurs de grande efficacité géométrique. Cette méthode, dite PGEI (Prompt-Gamma Energy Integration) a été étudiée par simulation GATE pour une cible homogène. La figure 2 montre la sensibilité de la méthode pour le déplacement d'une cible en PMMA (Poly Méthacrylate de Méthyle Acrylique) irradiée par un faisceau de  $1,5 \cdot 10^7$  protons de 160 MeV, avec un ensemble de 8 détecteurs situés en avant (amont) et en arrière (aval) de la cible. Ce résultat montre l'intérêt de la méthode d'intégration PGEI, pour laquelle la sensibilité est légèrement dégradée par rapport à la méthode de dénombrement de gamma prompts dite PGPI, proposée par notre collaboration en 2017, et utilisant la mesure de temps de vol pour sélectionner les gamma-prompts. La méthode PGPI n'est pas utilisable dans le cas d'un synchro-cyclotron à cause de la durée des impulsions.

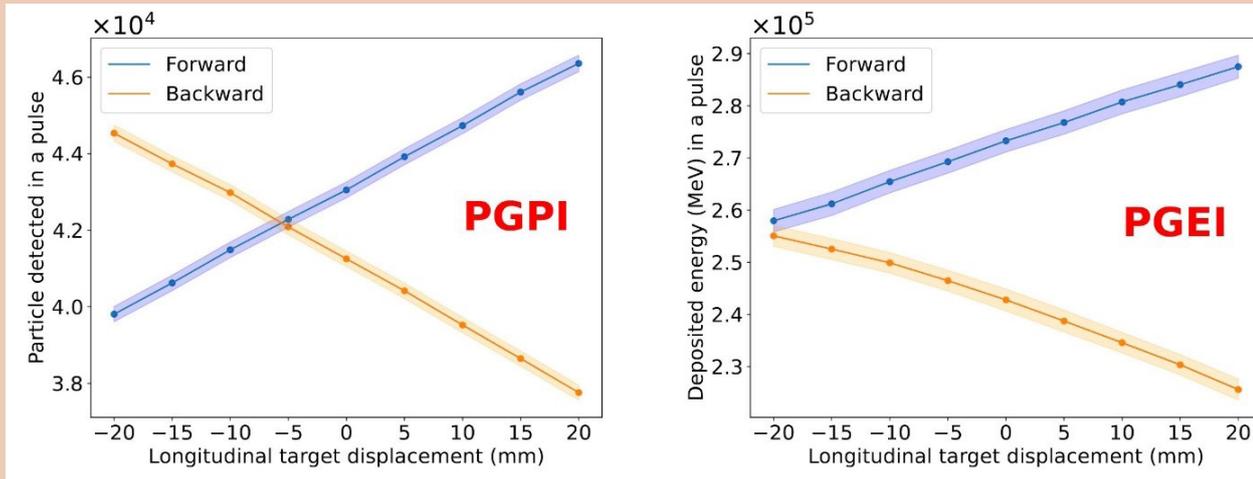


Figure 2 (Crédit : Pierre Everaere, LPSC, CNRS).

Dépendance du taux de comptage gamma prompts par méthode de comptage intégral PGPI (gauche) et par méthode d'intégration en énergie PGEI (droite), par paquet de  $1,5 \times 10^7$  protons de 160 MeV irradiant une cible sphérique de matériau PMMA, avec un même ensemble de détection constitué de 8 détecteurs, en amont et en aval de la cible.

La collaboration CLaRyS (Contrôle en Ligne de l'hadronthérapie par Rayonnements Secondaires)

Cette étude a été accompagnée de mesures de faisabilité sur faisceaux au CAL-Nice et à ARRONAX-Nantes aux intensités instantanées comparables à celles du synchro-cyclotron S2C2 du CAL. Ces mesures ont montré la possibilité d'un système de détection

constitué de blocs de scintillateurs  $\text{PbWO}_4$  couplés à des tubes photomultiplicateurs, qui permettent une mesure non saturée. Les résultats de ces premières études ont été publiés dans [4].

L'étude du PGEI se poursuit dans le cadre d'un projet MITI 80 primes CLARYS-S2C2, avec la thèse de Sarah Otmani.

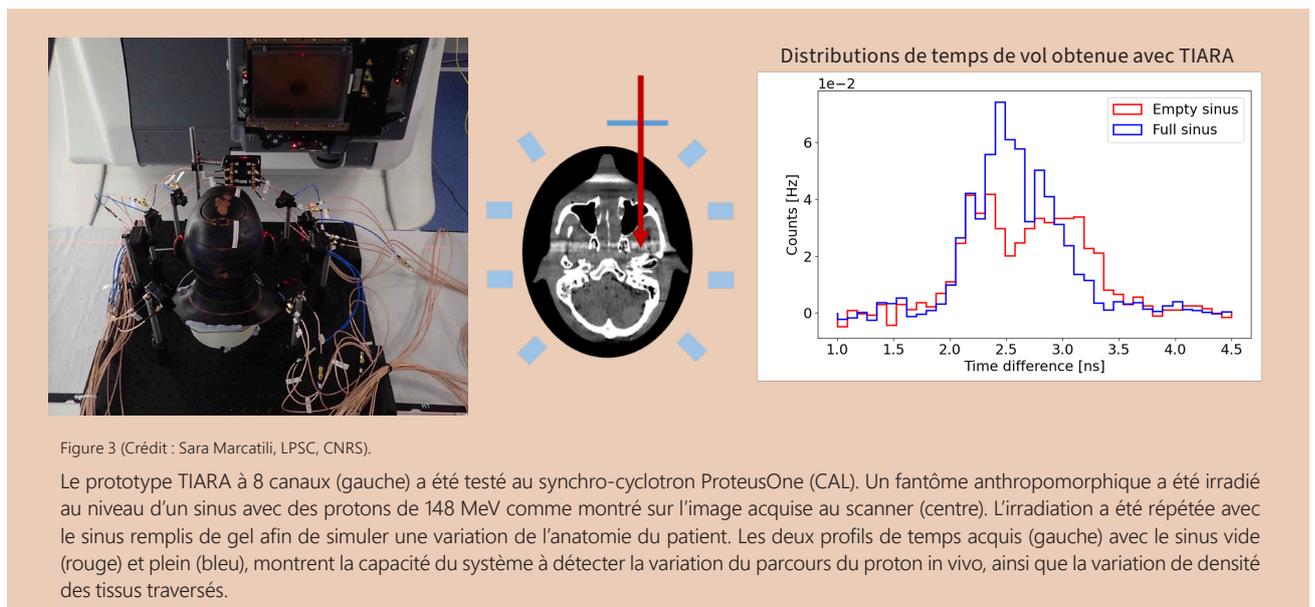
### Collaboration TIARA – projet PGTI

Dans le cadre du contrôle en ligne de traitements de hadronthérapie, le projet TIARA propose à la fois une nouvelle approche d'imagerie gamma (le Prompt Gamma Time Imaging – PGTI) et la réalisation d'un détecteur gamma rapide dédié, TIARA (Time-of-flight Imaging ARrAy), pour augmenter la sensibilité de la mesure du parcours de l'hadron in vivo et en temps réel.

Le détecteur TIARA sera composé de 30 modules répartis de manière uniforme autour du patient. Chaque module est basé sur un radiateur Cherenkov monolithique lu par quatre photomultiplicateurs au silicium (SiPM). TIARA est lue en coïncidence temporelle avec un moniteur faisceau dédié, basé sur un scintillateur plastique rapide, pour permettre la mesure du temps de vol total du proton incident et du GP avec une résolution temporelle de l'ordre de 100 ps rms (235 ps FWHM). La résolution d'un problème inverse permet de déterminer la distribution spatiale des points d'émission des GP, qui est fortement corrélée au parcours du proton dans le patient.

Ce projet est mené dans le cadre d'une collaboration entre le LPSC (porteur), le CPPM et le centre de proton-thérapie de Nice (Centre Antoine Lacassagne), et il est soutenu par un ERC starting grant.

Quatre ans de R&D ont permis la réalisation d'un bloc détecteur TIARA [5] et d'un moniteur [6] qui respectent le cahier de charge en terme de résolution temporelle. Le moniteur faisceau permet également la mesure du point d'impact de la particule incidente avec une résolution spatiale inférieure à 2 mm pour la particule unique. Un prototype TIARA incluant 8 blocs détecteurs (figure 3, gauche) a été récemment réalisé. De nombreuses expériences sous faisceau de protons et ions carbone menées dans différents centres cliniques ont permis de démontrer la faisabilité de l'approche PGTI pour des irradiations réalisées avec des cyclotrons, synchro-cyclotrons (CAL) et synchrotrons (CNAO). L'excellente résolution temporelle du système, ainsi que son insensibilité aux neutrons, principale source de bruit pour cette application, contribuent à la mesure de distributions de temps de vol caractérisées par un rapport signal sur bruit très élevé. Cela permet d'atteindre une précision millimétrique sur le parcours de l'hadron à l'échelle d'un spot d'irradiation, grâce à la mesure de la largeur de la distribution de temps de vol (figure 3, droite). Ces données permettent également de mesurer la variation du taux de production de GP le long du parcours de l'hadron et donc d'obtenir une information sur la densité et le pouvoir d'arrêt dans les tissus traversés, ouvrant des perspectives pour l'utilisation de TIARA pour l'imagerie protonique.



# Modélisations biophysiques et dosimétrie : radiothérapies ciblées

D'autres types de RT innovantes dites ciblées sont adaptées aux cancers radiorésistants diffus ou métastasés, combinant un ciblage moléculaire à l'échelle de la cellule cancéreuse via un vecteur injecté au patient, et l'irradiation locale par des ions de faible parcours ( $\sim 10\text{-}70\ \mu\text{m}$ ) très agressifs. On peut considérer deux approches d'irradiation : soit directement via un radiopharmaceutique couplé à un émetteur alpha (radiothérapie interne vectorisée, RIV- $\alpha$ ), soit en activant le bore-10 contenu dans un vecteur spécifique par un champ neutronique (BNCT). Ces thérapies induisent une hétérogénéité de dose micro-métrique qu'il est important de prendre en compte dans les modèles pour la prédiction d'effet biologique. C'est précisément l'objet du projet PICTURE (IP2I porteur, LPSC et LIRIS), démarré début 2021 et

mené en collaboration avec l'IP2I, qui vise à fournir des outils de modélisation et de prédiction d'effet biologique pour ces deux thérapies. En particulier, il doit permettre d'adapter le modèle biophysique NanOx pour les basses énergies d'ions, et répondre à la problématique des échelles des cibles biologiques critiques (ADN, cellule, tissus...) et des cibles cellulaires sensibles (noyau, cytoplasme, membrane...) d'intérêt pour ces deux thérapies en fonction de la pénétration intra-cellulaire et intra-tumorale des vecteurs. Au LPSC, Victor Levrague a réalisé sa thèse (2021-2024) sur la prédiction de réponse thérapeutique en RIV- $\alpha$ . Après avoir adapté l'algorithmie du modèle NanOx pour les basses énergies d'ions ( $< 10\ \text{MeV}$ ), menant à un article publié [7] et à la mise en libre-accès des codes développés, il a pu démontrer que l'hétérogénéité de distribution intra-cellulaire du vecteur impactait peu la réponse tumorale pour des tumeurs de plus de  $50\ \mu\text{m}$  de rayon, indépendamment du radionucléide choisi (émetteur alpha), mais devenait très impactante pour des concentrations de radionucléides faibles ( $< 10$  désintégrations par cellule). Il a également démontré que l'hétérogénéité intra-tumorale de distribution jouait un rôle majeur dans l'efficacité thérapeutique. Un résultat de ce travail est illustré en figure 4 et un article est en cours.

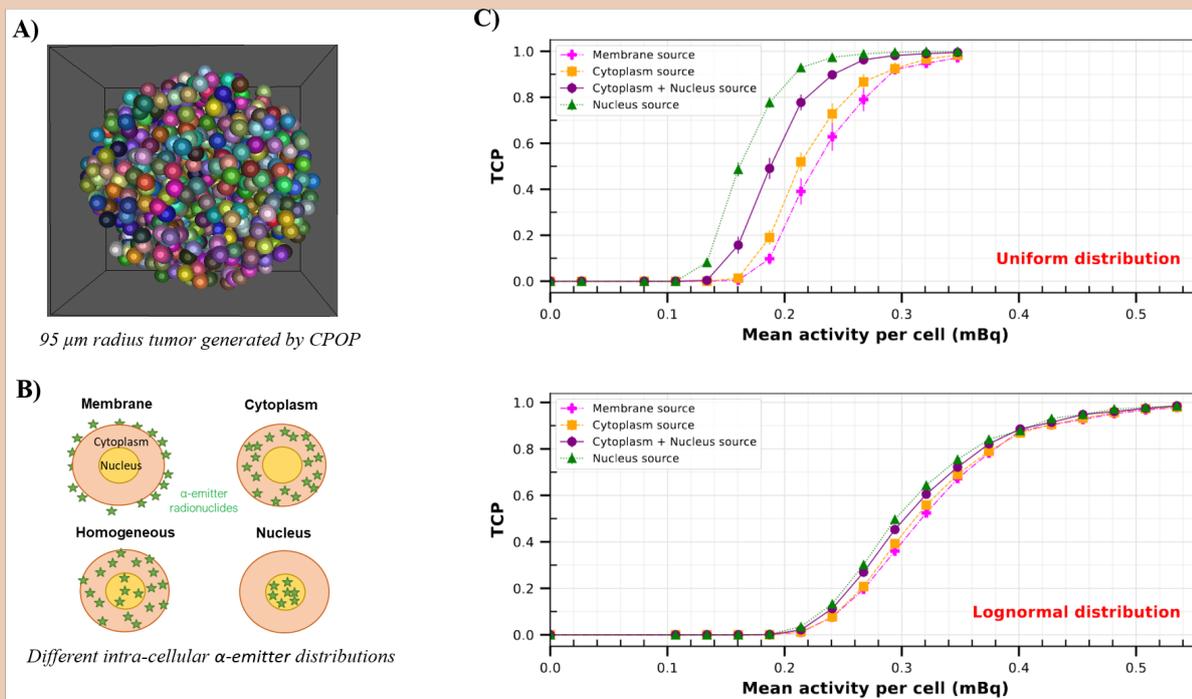


Figure 4 (Crédit : Victor Levrague, LPSC, CNRS).

Résultat de prédiction de probabilité de contrôle tumoral (TCP) avec une chaîne de calcul utilisant Geant4 et le modèle NanOx adapté aux ions de basse énergie, pour une micro-tumeur (illustré A) soumise à une irradiation de RIV- $\alpha$  en fonction de l'hétérogénéité intra-cellulaire (illustré B) et intratumorale (résultat C, comparaison des conditions « uniforme » vs « lognormal ») de distribution des sources  $\alpha$ . On démontre qu'une grande hétérogénéité intra-tumorale réduit la probabilité de contrôle tumoral.

Enfin, Maria Pedrosa Rivera (2021-2023) a dédié son postdoc à la faisabilité d'expériences de radiobiologie sur la plateforme ALTO (IJCLab), visant à fournir les données de survies cellulaires en ions  $^4\text{He}$  et  $^7\text{Li}$  nécessaires à l'adaptation du modèle biophysique NanOx pour ces thérapies, et aux modélisations appliquées à la BNCT. Ce travail a mené à la création d'une ligne de radiobiologie dédiée (BioALTO) et un moniteur diamant a été réalisé dans l'équipe pour contrôler ces faisceaux d'ions, actuellement en cours d'installation sur la ligne. Par ailleurs, nos compétences en

modélisation biophysique se sont étendues depuis 2023 à l'application de la radioprotection de la radiation spatiale, avec un nouveau projet en collaboration avec des chercheurs de la NASA, visant à comprendre les mécanismes mis en jeu dans la compaction de l'ADN sur la probabilité d'induction de cassures complexe d'ADN et de cancérogenèse lorsque des organismes sont soumis aux radiations cosmiques. Un article de conférence a été produit sur les premiers résultats de ce travail [8].

## Physique nucléaire

Les activités de physique nucléaire comportent deux volets.

Le premier, sur la physique des détecteurs, consiste à développer un télescope  $\Delta E$ -E monolithique en diamant pour l'identification de particules chargées (collaboration LPSC- NEEL, codirection Alexandre Portier 2019-2023 financement IDEX-UGA DIATEL puis thèse Claire Léonhart 2023 – 2025 financement CNRS MITI 80 PRIME). L'étage  $\Delta E$  a été dimensionné pour être traversé par la particule incidente qui sera ensuite stoppée dans l'étage E. La corrélation entre les deux mesures permet l'identification de la particule. L'objectif technologique pour la croissance diamant repose sur le savoir-faire de DiamFab, la start-up de l'institut NEEL, en particulier sur son procédé de croissance CVD d'une couche épitaxiée mince (quelques  $\mu\text{m}$ ) de diamant de bonne qualité avec une concentration de dopage au bore (dopage p) bien contrôlée sur un diamant intrinsèque. Ce détecteur dont la conception a démarré fin 2020 a nécessité la mise en œuvre de deux prototypes afin d'améliorer les procédés de croissance. Le second prototype a été testé avec succès sur un banc au LPSC, exposé à une source alpha d'énergie 5.5 MeV. Les mesures effectuées ont permis de valider les dimensions des différentes couches obtenues par croissance comme étant non seulement conforme au cahier des charges mais aussi permettant une mesure précise des dépôts d'énergie. La validation finale se fera au premier semestre 2025 sur l'installation de microfaisceaux AIFIRA à Bordeaux.

Le second, sur la physique théorique, consiste en des recherches qui se concentrent sur l'étude de la structure nucléaire des noyaux dans la région de

masse  $A=80$ -150 avec un intérêt particulier pour leur comportement transitoire à proximité des symétries du point critique. Il s'appuie sur nos travaux antérieurs, dont le plus récent est la description macroscopique et microscopique de la transition de phase du premier ordre dans les noyaux avec le nombre de neutrons  $N=40$ , 60 et 90. Plus récemment, nous étudions également la transition entre la déformation axiale et triaxiale. Deux approches théoriques sont utilisées à cette fin, le modèle collectif algébrique (ACM) et l'approche Skyrme-Hartree-Fock (SHF).

Le modèle ACM est une version algébrique du modèle de Bohr-Mottelson limitée aux degrés de liberté vibrationnels et rotationnels. Les deux modèles sont caractérisés par une structure algébrique bien définie. Un avantage particulier de l'ACM est que différentes limites de structure et leurs symétries peuvent être décrites de manière pratique à l'aide d'un simple Hamiltonien géométrique.

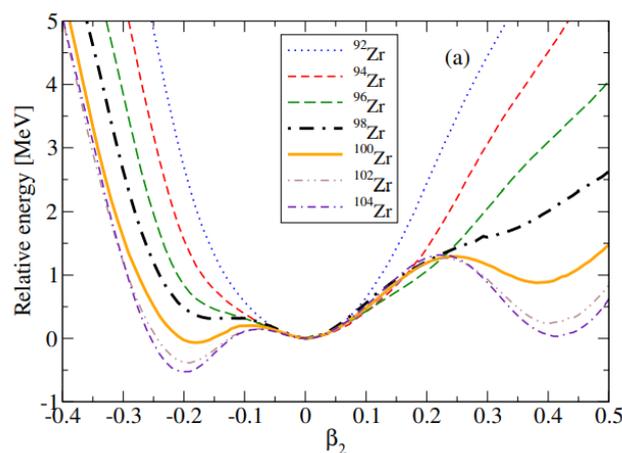


Figure 5 (Crédit : Gabriela Thiamova, LPSC, CNRS).

Courbes d'énergie potentielle en fonction de la déformation pour les isotopes du zirconium et pour la paramétrisation SV-bas (systematic variation basic), qui est la paramétrisation de base de l'interaction Skyrme.

Le modèle SHF fait partie des modèles de structure nucléaire les plus utilisés et représente une possibilité microscopique d'étudier les propriétés de l'état fondamental nucléaire. Il existe de nombreux paramétrages fonctionnels de la SHF qui sont testés sur les isotopes étudiés. Le comportement d'un point critique est typiquement reflété par une courbe d'énergie potentielle (PEC) spécifique. Par exemple, dans la limite  $X(5)$ , qui caractérise le point critique de transition de

phase entre la forme sphérique et la forme déformée axialement dans les noyaux atomiques, on s'attend à observer une structure de bosse typique dans les calculs de la courbe d'énergie potentielle en fonction du paramètre de déformation. La méthode est donc très utile pour détecter un candidat potentiel pour une symétrie de point critique donnée. Un exemple de ce comportement est illustré en figure 5.

## POUR EN SAVOIR +

### Thèses et HDR

- Contrôle en ligne en protonthérapie – Conception d'un moniteur de faisceau en technologie diamant et mise en œuvre d'une technique de détection de rayons gamma prompts adaptée aux faisceaux cliniques, Pierre Everaere, Université Grenoble Alpes, 2023, <https://theses.hal.science/tel-04592924>
- Conception d'un détecteur pour l'imagerie Gamma Prompt basé sur temps de vol, Maxime Jacquet, Université Grenoble Alpes, 2023, <https://theses.fr/2023GRALY043>
- Conception d'un moniteur faisceau diamant pour le contrôle en ligne de faisceaux pulsés, Robin Molle, Université Grenoble Alpes, 2024, à paraître
- Modeling of biological effects at the micro- and nanometric scales for high and low-LET ion irradiations, Victor Levrargue, Université Grenoble Alpes, 2024, à paraître
- Développement d'une technique de caractérisation, le courant induit par faisceau d'électrons à temps de vol, et conception de détecteurs en diamant pour l'identification des particules à faible parcours, Alexandre Portier, Université Grenoble Alpes, 2023, <https://theses.fr/2023GRALY026>
- Novel methods for real time imaging and dosimetry in Particle Therapy, Sara Marcatili, Université Grenoble Alpes, 2024, à paraître

### Principales publications

1. F. Lafont, J. Baruchel, J. Bousquet, E. Capria, R. Celestre, M. Cotte, D. Dauvergne, P. Everaere, M.-L. Gallin-Martel, C. Hoarau, O. Ibourk, J. Letellier, R. Molle, J.-F. Muraz, D.Z. Nusimovici, M. Reynaud, T.N. Tran-Caliste, "A new X-ray beam induced current setup, coupled with X-ray diffraction imaging, for diamonds and semiconductors characterization by synchrotron techniques at ESRF", *Diamond and Related Materials* 140 (Part B) 110454 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110454>
2. F. Di Franco, N. Rosuel, L. Gallin-Martel, M.-L. Gallin-Martel, M. Ghafooryan-Sangchooli, S. Keshmiri, J.-F. Motte, J.-F. Muraz, P. Pelliccioli, M. Ruat, R. Serduc, C. Verry, D. Dauvergne, J.-F. Adam, "Monocrystalline diamond detector for online monitoring during synchrotron microbeam radiotherapy", *Journal of Synchrotron Radiation* 30 (6) 1076 (2023), <https://doi.org/10.1107/S160057752300752X>
3. N. Krah, D. Dauvergne, J. M. Létang, S. Rit, E. Testa, "Relative stopping power precision in time-of-flight proton CT", *Physics in Medicine and Biology* 2022, 67, 165004. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ac7191>, <http://arxiv.org/abs/2112.11575>
4. P. Everaere, D. Dauvergne, M.-L. Gallin-Martel, J. Hérault, A. Koudia, C. Koumeir, J. M. Létang, E. Testa, « Prompt Gamma Energy Integration: a new method for online-range verification in proton therapy with pulsed-beams" *Frontiers in Physics*, 2024, 12, pp.1371015. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1371015>, <https://hal.science/hal-04700855v1>
5. M. Jacquet et al., "A high sensitivity Cherenkov detector for prompt gamma timing and time imaging", *Scientific Report* (2023) 13:3609, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30712-x>, <https://arxiv.org/abs/2309.03612>
6. A. André et al., "A fast plastic scintillator for low intensity proton beam monitoring", *TRPMS-2024*. <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2024.3498959>
7. M. Alcocer-Avila, V. Levrargue, R. Delorme, E. Testa, M. Beuve, "Biophysical modeling of low-energy ion irradiations with NanOx". *Med Phys.* 2024;1-14. <https://doi.org/10.1002/mp.17407>
8. V. Levrargue, R. Delorme, M. Roccia, N. H. Tran, S. Incerti, M. Beuve, E. Testa, I. Plante, S. Rahmanian And F. Poignant, "Comparison of Geant4-DNA and RITRACKS/RITCARD: microdosimetry, nanodosimetry and DNA break predictions", *Arxiv proceeding for XXth ICCR Conference*, 8-11 July 2024, Lyon, France, <https://hal.science/hal-04775893v1>
9. A. Prášek, P. Alexa, D. Bonatsos, G. Thiamová, D. Petrellis, P. Veselý, « Phase transitions in  $N = 40, 60$  and  $90$  », *nuclei Phys. Rev. C* 110, 024317, 2024, <https://arxiv.org/abs/2407.16428>

# NEUTRONS POUR LA SCIENCE ET LA SOCIÉTÉ

Les sources de neutrons compactes et intenses basées sur accélérateurs (Compact Accelerator Neutron Source - CANS) ont des applications sociétales nombreuses, parmi lesquelles on peut citer, pour les activités qui nous concernent, la radiothérapie et la production de radio-isotopes. Un des objectifs finals des recherches menées au LPSC sur ces sujets est la définition d'une installation de référence pour la radiothérapie neutrons BNCT (Boron Neutron Capture Therapy), qui couplerait l'accélérateur, la cible, les modérateurs, et les détecteurs de caractérisation spectrale du champ neutronique et de mesure du flux. Chacune de ces briques fait l'objet d'études au LPSC.

## **Membres permanents**

Sébastien Chabod, Olivier Guillaudin, Daniel Santos (responsable d'équipe).

## **Membre non permanent**

Enya Mobio (doctorante visiteur).

## **Personnels des services techniques**

Julien Giraud (Service Études et Réalisations Mécaniques), Christophe Hoarau (Service Électronique), Julien Marpaud, Marc Marton, Jean-François Muraz, Nadine Sauzet (Service de Détecteurs et Instrumentation).

# Modérateur Optimal pour l'AB-BNCT

En AB-BNCT (Accelerator Based - BNCT), le champ de neutrons utilisé pour le traitement des patients est généré par une source compacte de neutron,  ${}^7\text{Li}(p,n)$ ,  ${}^9\text{Be}(d,n)$  ou  ${}^{13}\text{C}(d,n)$ . Ces sources produisent des champs neutroniques intenses mais très énergétiques, qui doivent donc être modérés pour préserver les tissus sains des patients. Cette modération est effectuée dans un composant clé, appelé Beam Shaping Assembly (BSA), positionné entre la source et le patient. La conception habituelle de ce composant est effectuée à l'aide de procédures d'optimisation paramétrique, qui ne permettent pas d'explorer toutes les structures

possibles.

En utilisant un algorithme d'optimisation topologique (OptTop) [1,3] développé en interne (cf. équipe Physique des Réacteurs), l'équipe AB-BNCT du LPSC est parvenue à contourner ce problème, et à calculer la meilleure structure possible d'un BSA Air-AIF<sub>3</sub>-LiF-LiFPE pour une cible  ${}^7\text{Li}(p(2.5\text{ MeV}, n)$  dans le cadre du traitement d'un cancer du cerveau de type glioblastome. Le BSA obtenu par OptTop présente une structure inédite, qui utilise un collimateur de forme annulaire pour mimer un traitement BNCT multi-faisceau (Figure 1). Cette structure inédite induit une profondeur de traitement BNCT record, TD = 10,3 cm. Cette valeur est 30 % supérieure aux meilleurs résultats obtenus jusqu'ici par la communauté BNCT mondiale, illustrant le potentiel de l'approche OptTop.

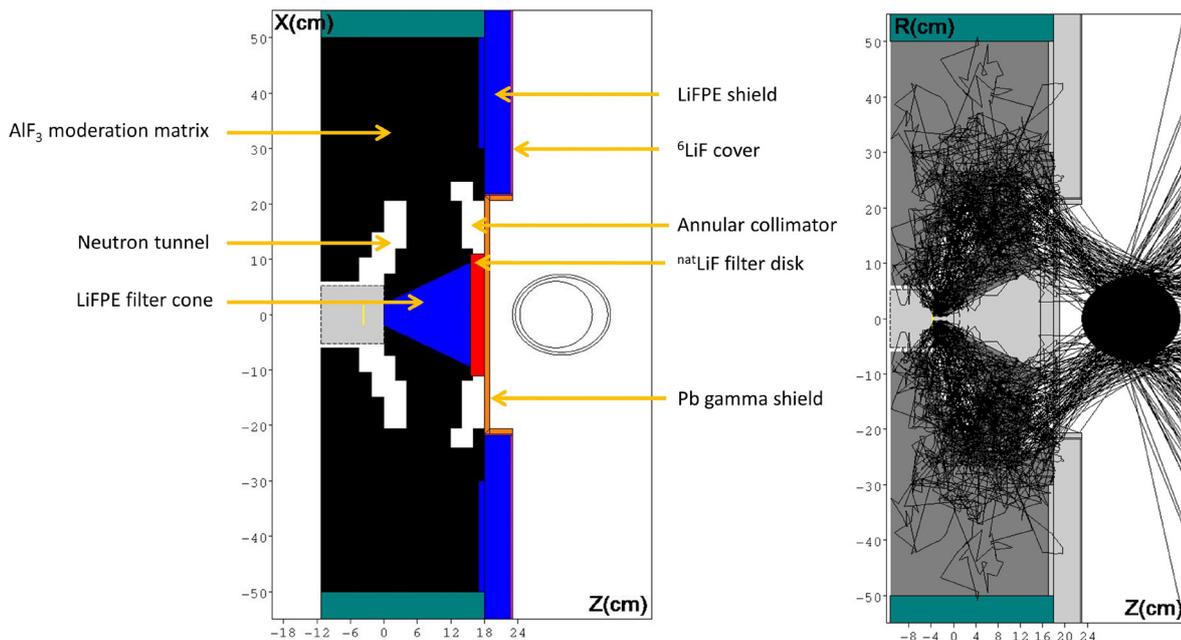


Figure 1 (Crédit : Sébastien Chabod, LPSC, CNRS).

À gauche : structure du BSA topologiquement optimisé. Noir = AIF<sub>3</sub>, blanc = air, vert = béton lourd, bleu = polyéthylène enrichi en LiF (LiFPE), rouge = LiF, rose = <sup>6</sup>LiF, orange = plomb. À droite : 100 trajectoires (Z,R) de neutrons dans le BSA qui atteignent la tête du patient et contribuent donc au traitement. Z est la position d'une collision neutronique le long de l'axe du faisceau, R sa distance radiale à l'axe du faisceau. On observe que la combinaison du cône filtrant en LiFPE+LiF et du collimateur annulaire génère un champ de neutrons inédit, qui mime un traitement multi-faisceau et améliore sa pénétration dans la tête du patient.

## Nouveau Détecteur pour la caractérisation de champs neutroniques à haut flux

L'équipe MIMAC du LPSC a développé un nouveau détecteur gazeux, appelé Neutron Field Monitoring (NFM), qui donne accès à la mesure du flux neutronique en fonction du temps avec une séparation nette des noyaux d'hélium et de lithium-7 produits par captures neutroniques sur un dépôt de  $^{10}\text{B}$  d'épaisseur connue. Un premier prototype de ce détecteur a été produit en 2023 et un démonstrateur (figure 2) a été fabriqué en 2024.

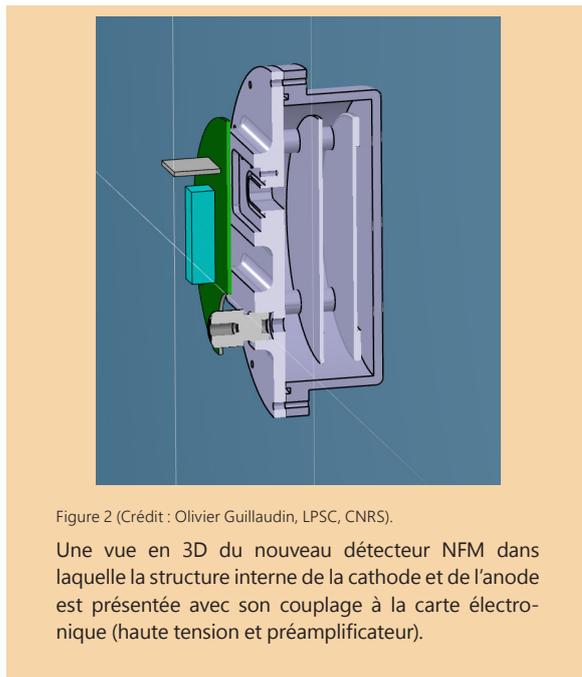


Figure 2 (Crédit : Olivier Guillaudin, LPSC, CNRS).

Une vue en 3D du nouveau détecteur NFM dans laquelle la structure interne de la cathode et de l'anode est présentée avec son couplage à la carte électronique (haute tension et préamplificateur).

## Caractérisation en énergie du champ neutronique produit proche du seuil de production

Dans le cadre de la thèse d'E. Mobio, un champ neutronique épithermique a été produit sur l'installation AMANDE (LMDN (IRSN)), en utilisant la réaction  $^7\text{Li}(p,n)$  proche du seuil. Cette réaction produit un champ bi-énergétique, avec une moyenne autour de 30 keV, que nous avons caractérisé en énergie lors d'une mesure dédiée avec notre détecteur MIMAC-FastN [4]. E. Mobio a ensuite conçu un modérateur simplifié, constitué d'un hémisphère en polyéthylène (PE), placé autour de la cible pour produire un champ majoritairement épithermique, qui a été caractérisé en fluence par le détecteur NFM.

### POUR EN SAVOIR +

#### Principales publications

1. Heavy-water-based moderator design for an AB-BNCT unit using a topology optimization algorithm, S.Chabod, J. Giraud, M. Hervé, D. Santos, N. Sauzet, *Phys. Med. Biol.* 67 (2022) 105009
2. Development of a high current electron beam facility for Compact Accelerator Neutron Source target thermal tests, J.-F. Muraz, D. Santos, V. Ghetta et al. *NIMA* 1062 (2024) 169214
3. Multi-material topology optimization of nuclear devices – principle and application, Sébastien Chabod, Daniel Santos, Nadine Sauzet, *EPJ Web of Conferences* 302, 15004 (2024)
4. Directional detection of keV proton and carbon recoils with MIMAC C. Beaufort, O. Guillaudin, D. Santos, N. Sauzet, E. Mobio, R. Babut, C. Tao, *2024 JINST* 19 P05052

# ACCÉLÉRATEURS, SOURCES D'IONS ET PLASMAS



Le pôle Accélérateurs et Sources d'Ions du LPSC a pour mission de concevoir, réaliser et exploiter des accélérateurs, ou certains de leurs sous-systèmes, pour les programmes de physique et pour des applications industrielles. Il est également spécialisé dans le domaine de la R&D sur les sources d'ions à la résonance cyclotronique électronique (RCE) avec une gamme d'applications très variées : sources d'ions lourds multichargés, sources d'amplification d'état de charge (ou boosters de charge), sources à très haute fréquence. Il exploite également la plateforme de neutrons rapides GENESIS (GEnerator of NEutrons for Science and IrradiationS). Les activités du pôle concernent la physique des accélérateurs et ses technologies associées : dynamique de faisceau, radiofréquence, diagnostics, magnétisme, vide. Elles s'adressent à un large spectre des thématiques de recherche du laboratoire : physique nucléaire (production de faisceaux d'ions stables ou radioactifs) et des particules (études des collisionneurs), physique des réacteurs (réacteur piloté par accélérateur). Le pôle contribue à plusieurs programmes majeurs d'accélérateurs et de sources d'ions en France ou en Europe. À travers ces collaborations, plusieurs axes d'étude et de recherche amont ont récemment été initiés comme la simulation du plasma dans une source RCE, la compréhension de phénomènes spécifiques dans les structures accélératrices ou encore l'étude de compensation de pannes dans les accélérateurs linéaires de particules.

L'activité de recherche du pôle Plasmas-Matériaux-Nanostructures porte sur des aspects fondamentaux et technologiques des plasmas micro-onde, allant de la conception, l'étude et le développement de sources plasma unitaires, jusqu'à la mise en œuvre de réacteurs et de procédés par plasma. Elle est structurée autour de deux principaux axes : le premier concerne la conception et étude de sources plasma micro-ondes ; le second porte sur les applications des plasmas aux procédés en volume et sur surface.

Ces activités sont menées en collaboration avec des partenaires académiques internationaux comme par exemple, l'Université de Patras, l'École Polytechnique de Lausanne, l'Université de Mostaganem, l'Université de Montréal et l'INRS de Varenne-Québec, Centre National de Recherche de Cairo. Enfin, l'équipe apporte également des compétences et savoir-faire complémentaires dans des projets collaboratifs (ANR, Carnot-Énergies du futur) menés en partenariat avec différents groupes de recherche nationaux ou bien en partenariat avec des industriels quand la vocation est applicative.

# PÔLE ACCÉLÉRATEURS ET SOURCES D'IONS

Le pôle accélérateurs et sources d'ions mène des activités de R&D, de construction et d'exploitation d'accélérateurs de particules et de leurs sous-systèmes. Il est spécialisé dans la dynamique des faisceaux, les études de fiabilité des accélérateurs et les aspects liés à la radio-fréquence ainsi que dans la physique et la technologie des sources d'ions à la Résonance Cyclotronique Electronique (RCE) pour la production d'ions multichargés. Dans le cadre de collaborations nationales et internationales, le pôle est engagé dans des grands projets d'accélérateurs comme SPIRAL2 (Système de Production d'Ions RadioActifs en Ligne de 2ème génération), PERLE (Powerful Energy Recovery Linac for Experiments) et MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Application).

## Membres permanents

Thomas André, Julien Angot, Maud Baylac (responsable du pôle jusqu'en juin 2022), Laurent Bonny, Frédéric Bouly, Thierry Cabanel, Benjamin Cheymol, Jean-Marie De Conto, Emmanuel Froidefond, Yolanda Gómez Martínez (adjointe), Christophe Peaucelle (responsable du pôle depuis juillet 2022), Etienne Labussière, Myriam Migliore, Solenne Rey, Samuel Roni, Patrick Sole, Thomas Thuillier (adjoint).

## Membres non permanents

Bichu Bashkar (doctorant), Andrea Cernuschi (doctorant), Thomas Gémond (CDD), Quentin Hars (CDD), Manon Meyer (apprentie), Amal Karouani (CDD), José Antonio Méndez-Giono (doctorant), Adrien Plaçais (post-doctorant), Antoine Protin (CDD), Martin Venière (apprenti).

## Personnels des services techniques

Florent Collovati, Mathieu Da Silva, Olivier Guillaudin, Julien Marpaud, Jean-François Muraz, Yoann Sallaz-Damaz, Olivier Zimmermann (Service Détecteurs et Instrumentation), Romain Bourroux, Valentin Carraux, Pierre-Olivier Dumont, Marie Giannoni, Julien Giraud, Claude Guillorit, Mile Kusulja, Guillaume Huet, Eric Perbet, Sébastien Roudier, Francis Vezzu, Lucie Vivargent (Service Études et Réalisations Mécaniques), Christophe Hoarau, Eric Lagorio, Damien Tourres (Service Électronique), Guillaume Dargaud (Service Informatique).

## Projet NEWGAIN, Source d'ions lourds supraconductrice ASTERICS

Le laboratoire est impliqué dans le projet de construction du futur injecteur d'ions lourds au GANIL, NEWGAIN, pour NEW GANil INjector. Cet injecteur d'ions  $A/Q=7$  permettra d'atteindre des intensités inégalées d'ions très lourds, à une énergie de 7 MeV/A dans l'accélérateur linéaire (LINAC) de SPIRAL2. Financé en 2021 par un EQUIPEX+ de l'ANR (en collaboration avec le GANIL, le CEA et les laboratoires LPSC, IPHC, IJCLab, LP2IB et LPC Caen), le projet étudie une source d'ions, deux lignes basse énergie, un quadripôle radiofréquence et une ligne moyenne énergie rejoignant l'accélérateur

existant en amont du LINAC. La contribution du LPSC se fait à 2 niveaux : d'une part, en coordonnant l'ingénierie système dans l'équipe de direction du projet. Cette activité comprend la définition des spécifications techniques, des interfaces, de la configuration globale du projet et plus généralement de la coordination technique entre les différents métiers. D'autre part, le pôle est responsable du lot de la tâche de coordination du développement d'une source d'ions supraconductrice de très hautes performances nommée ASTERICS (Advanced Spiral Two Electron cyclotron Resonance Ion source at Caen with Superconducting magnet) (figure 1), munie de sa plateforme haute tension et d'une ligne de transport de faisceau, en collaboration avec le CEA, le GANIL et le LPC Caen. La conception mécanique de la source hors aimant supraconducteur (chambre à plasma, injection des atomes, culasse magnétique, châssis et chariots) ainsi que son instrumentation est sur le point de se terminer au LPSC, avec la participation des services de mécanique, d'électronique et du SDI.

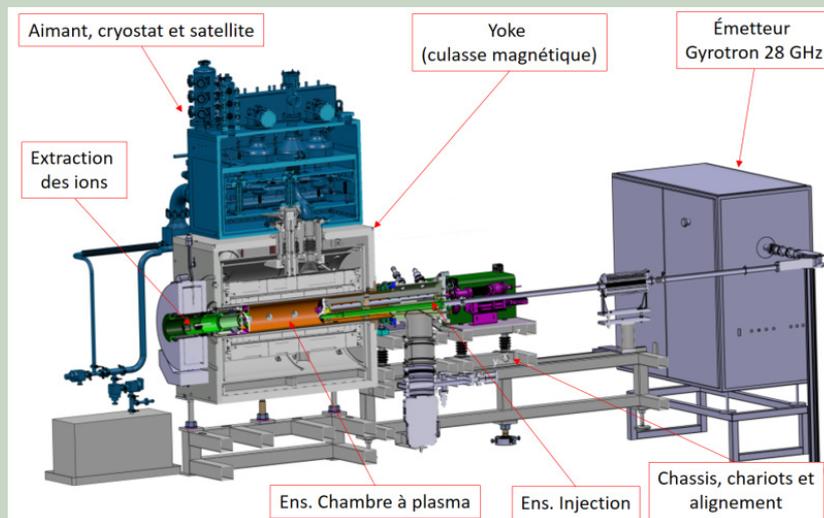


Figure 1 (Crédit : Francis Vezzu, LPSC, CNRS).

Vue en coupe de la source d'ions supraconductrice ASTERICS en cours de conception au LPSC en collaboration avec le CEA IRFU.

## Simulation du Plasma de source d'ions Multichargés : SPIM

Le projet SPIM (Simulation du Plasma de source d'Ions Multichargés) s'est déroulé de 2019 à 2023 grâce à un financement MITI-80 primes du CNRS. La recherche s'est effectuée en collaboration entre le LPSC et le LPGP d'Orsay. Le projet consistait à modéliser la formation du faisceau d'ions extrait du bord du plasma d'une source d'ions à la RCE, puis de mener des mesures expérimentales comparatives au LPSC sur la source d'ions PHOENIX V2 [1][2]. Ce projet a fait l'objet du projet de thèse de

José-Antonio Méndez-Giono. Des détecteurs innovants ont été développés pour mesurer l'émittance transverse en 4 dimensions des faisceaux d'ions issus de la source, ainsi que le spectre en énergie des électrons sortant du plasma. Un code de simulation de plasma, de type Monte-Carlo itératif, incluant un module de collisions et le calcul du potentiel plasma a été développé avec succès. Le code, fonctionnel, reste à être consolidé. Ce code permettra en particulier de fournir les flux de particules émis vers la gaine du plasma dans laquelle l'émittance du faisceau d'ions est déterminée.

La source d'ions PHOENIX Booster est utilisée dans la méthode *Isotope Separation On Line* (ISOL) pour augmenter l'état de charge des ions radioactifs (technique dite du *charge breeding*) et ainsi permettre de les ré-accélérer plus efficacement. Quatre exemplaires de cette source sont exploités : au GANIL (France, projet SPIRAL 1), à TRIUMF (Canada, projet ISAC), au LNL (Italie, projet SPES) et au LPSC sur le banc  $1+N^+$ . Un programme de R&D a été élaboré pour améliorer les performances de cette source, dont les résultats seront applicables dans les installations citées ci-dessus. Grâce aux dernières modifications, le vide de la ligne a été fortement amélioré. En outre, l'injection et le piégeage des ions ont été optimisés

en modifiant la structure magnétique de la source, ce qui a permis d'augmenter significativement les efficacités de conversion pour tous les éléments testés, comme par exemple pour  $Na^{8+}$  où l'efficacité initiale de 12,9 % a été portée à 18,7 %. La conception d'une nouvelle version de la source a été réalisée dans le but d'augmenter les états de charge et la pureté des faisceaux extraits ; les pièces sont en cours de fabrication. Un contrat entre le LNL et le LPSC est également en cours pour améliorer la pureté des ions extraits. Dans ce cadre, des techniques expérimentales innovantes ont été mises au point pour mesurer et identifier les contaminants, des pièces mécaniques ont été fabriquées pour la source de SPES et des campagnes de mesures ont été réalisées au LPSC en collaboration avec le GANIL. En parallèle, la source Booster est exploitée pour étudier la technique du charge breeding et plus largement les plasmas RCE, en collaboration avec des laboratoires étrangers. Ces études font l'objet de publications régulières<sup>[4]</sup>.

Depuis 2021, l'obtention de financements via un projet EQUIPEX+ sur la R&D accélérateurs à l'échelle nationale, nommé PACIFICS (porté par l'IJCLab), permet de soutenir les développements expérimentaux des sources d'ions.

## Simulation du concept d'accélération ECRIPAC

Le projet ECRIPAC (ECR Ion Plasma ACceleration) a débuté en 2023 avec la thèse d'Andrea

Cernuschi (UGA). Il s'agit d'étudier par simulation, avec la participation d'A. Garrigues du laboratoire LAPLACE (Toulouse), le concept original d'accélération de paquet d'ions proposé par R. Geller en 1990 [Voir Geller] à l'aide de technologie de sources d'ions. Après une étude bibliographique et une validation du phénomène avec un code Monte-Carlo, le docteur s'apprête à utiliser un code de type Particle In Cell (PIC) pour simuler le phénomène d'accélération plasma.

## Source d'ions à très haute fréquence (60 GHz)

Le projet SEISM (Sixty GHz ECR Ion Source using Megawatt Magnets) [3], relancé en 2019, est une source d'ions RCE, fonctionnant à très

haute fréquence (60 GHz). Ce prototype unique au monde (voir figure 2) a pour objectif d'étudier la formation, l'extraction, le transport et la qualité des faisceaux d'ions de très haute intensité, afin d'ouvrir de nouvelles possibilités pour les accélérateurs de nouvelle génération à l'intensité extrême. Compte tenu de l'intensité de courant requis pour alimenter les bobines, le prototype doit être exploité avec les infrastructures du LNCMI.

La source exploite deux ensembles de bobines résistives en configuration magnétique en « cusp », de

structure polyhélice, capables de générer une surface magnétique fermée de 2,1 T qui ont été développées par le LPSC et opérées au LNCMI-Grenoble. Le plasma de la source est alimenté par un gyrotron pulsé de 300 kW et la production de faisceaux d'ions avec une densité de courant atteignant  $1 \text{ A/cm}^2$  a été démontrée. Une nouvelle ligne de transport, plus performante et équipée de diagnostics avancés, tels que des coupelles de Faraday et un système d'analyse de l'émittance, de type « pepperpot », a été installée. Validée en 2021, elle permet d'obtenir une transmission de faisceau de 75 %. Suite à un incident, les bobines ont dû être remplacées. Reconstituées avec le procédé innovant de *coldspray*, elles ont été testées avec succès en 2023.

Lors des expérimentations menées au LNCMI, l'équipe a récemment été confrontée à des limitations non anticipées sur le courant extrait. Des simulations ont montré que l'amélioration d'une décade du vide résiduel augmentait significativement le temps de neutralisation du faisceau, entraînant une chute de l'efficacité de l'extraction des ions par un facteur trois. Une modification pour réguler la pression a été développée et installée, et sera testée lors des campagnes expérimentales prévues pour 2025.

Parallèlement, une jouvence majeure de la source d'ions à 60 GHz est prévue avec le support du financement national EQUIPEX+ (voir section sur PACIFICS) pour remplacer les aimants résistifs actuels par des bobines supraconductrices. Le

prototype pourra alors être exploité sur le site du LPSC et bénéficier de campagnes expérimentales étendues, sans les limites actuelles imposées au LNCMI. Des simulations magnétiques d'une structure de bobines magnétiques axisymétriques supraconductrices ont été effectuées et ont conduit à un contrat industriel pour leur fabrication. Elles seront livrées en 2026.



Figure 2 (Crédit : Thomas André, LPSC, CNRS).

Photo de la source SEISM avant son installation au LNCMI.

## Source d'ions Booster

La source d'ions PHOENIX Booster est utilisée dans la méthode Isotope Separation On Line (ISOL) pour augmenter l'état de charge des ions radioactifs (technique dite du charge breeding) et ainsi permettre de les ré-accélérer plus efficacement. Trois exemplaires de cette source sont exploités au GANIL (France, projet SPIRAL1), à TRIUMF (Canada, projet ISAC Isotope Separation and ACceleration) et au LNL (Italie, projet SPES Selective Production of Exotic Species). Au LPSC, les études sur le Booster de R&D, réalisées en collaboration avec le GANIL dans le cadre du projet IN2P3 « Charge breeding », ont récemment permis de sensiblement faire progresser les efficacités (10-20 %) tout en conservant des temps de processus identiques. Dans le but d'obtenir une plus grande facilité de

réglage et de meilleures conditions d'injection et d'extraction des ions, le Booster du LPSC a été modifié en 2022 pour passer en configuration « 5 bobines ». C'est dans cette configuration que de nombreuses expérimentations sur la réduction de la contamination co-extraite de la source ont été réalisées, dans le cadre d'un contrat de collaboration et de recherche avec le LNL. Elles ont nécessité le développement d'instrumentations pointues sur le banc 1+N+ et de programmes d'analyse des mesures [4]. En utilisant des chemisages en matériau de haute pureté, ces études ont permis de révéler que certaines surfaces inattendues subissaient une pulvérisation due au plasma et contribuaient à augmenter les impuretés. Elles ont également permis de développer des systèmes mécaniques pour faciliter la mise en place des chemisages en vue d'une utilisation en opération. Suite à ces études, le Booster a été modifié dans la configuration « Grand diamètre » - le volume du plasma a été augmenté en

remplaçant le noyau central de la source - en juillet 2024 dans le but d'augmenter l'état de charge des ions tout en réduisant la contamination. Les premières

expérimentations en « mode source seule » ont montré une amélioration des performances par exemple avec l'augmentation de 37 % de la production  $O^{6+}$ .

## PACIFICS

Le LPSC bénéficie du soutien de l'EQUIPEX+ PACIFICS de l'ANR dont le but est de contribuer à l'amélioration des performances des sources d'ions du

pôle en finançant la jouvence d'équipements majeurs. Plusieurs études ont été menées et ont conduit à la publication d'appel d'offres en cours : pour le projet 60 GHz, remplacement des bobines résistives et passage en continu de la source de puissance Haute Fréquence (gyrotron), acquisition d'un générateur de fréquence variable pour le booster de charge.

## Le projet MYRRHA

Le projet MYRRHA porté par le SCK-CEN vise à la construction d'un réacteur nucléaire piloté par accélérateur à Mol (Belgique) pour l'étude de la transmutation de certains déchets nucléaires. L'accélérateur doit produire un faisceau de protons de 4 mA à 600 MeV. Le pôle participe à deux contrats de collaboration entre le CNRS/IN2P3 et le SCK-CEN pour la phase 1, MINERVA (MYRRHA Isotopes

production coupling the linEar acceleRator to the Versatile proton target fAcility), qui consiste à construire la structure d'accélération jusqu'à 100 MeV et des lignes d'expériences. Jusqu'en 2024, le pôle a été impliqué dans les études du phénomène de « multipactor » [5], les tests des coupleurs de puissance RadioFréquence (RF), des études de dynamique faisceau [6] et le développement de profileurs (à fil et non invasif). Les tests des coupleurs de puissance, conçus au LPSC, se sont déroulés d'avril 2021 à septembre 2023 à l'IJCLab (voir figure 3). Ils ont permis de valider ces coupleurs et confirmer le rôle crucial des dépôts de nitrure de titane.

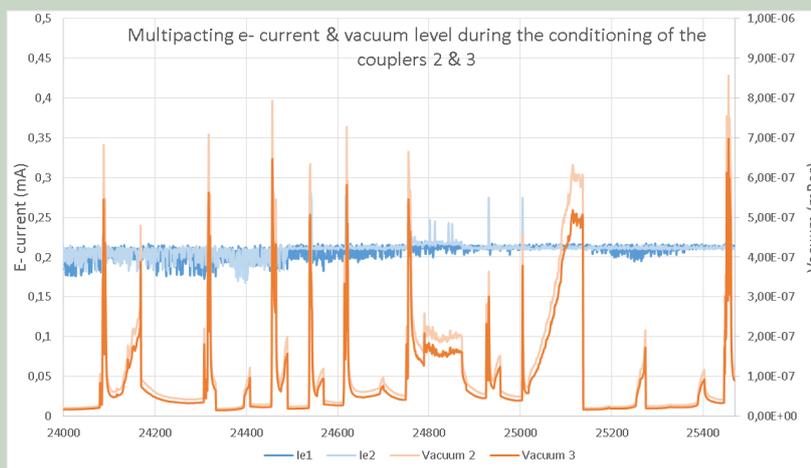


Figure 3 (Crédits : Pierre-Olivier Dumont, LPSC, CNRS / Christophe Joly, IJCLab, CNRS).

À droite : Évolution du courant de multipacting et du vide. À gauche : Coupleur de puissance.

Par ailleurs, le pôle a fourni l'étude de conception et un prototype de profileur à fil avec son électronique de pré-amplification conçue par le service électronique (voir figure 4). Ce détecteur sera placé dans les lignes de transport de moyenne et haute énergie (17 MeV et 100 MeV). L'étude thermique a permis de déterminer que le courant idéal admis par le fil est de 4 mA, avec

un cycle utile de 0,5 % (impulsion de 500  $\mu$ s avec une fréquence de répétition de 1 Hz). Au-delà, l'émission thermo-ionique est prépondérante. L'étude complète d'un profileur non invasif électrostatique à ionisation a été rédigée, abordant de nombreuses configurations différentes, y compris l'ajout d'un champ magnétique.

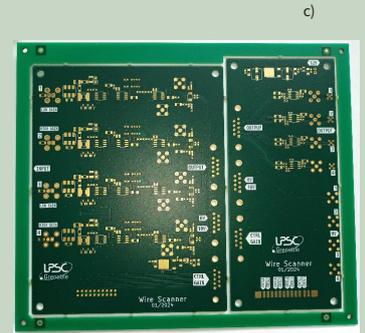
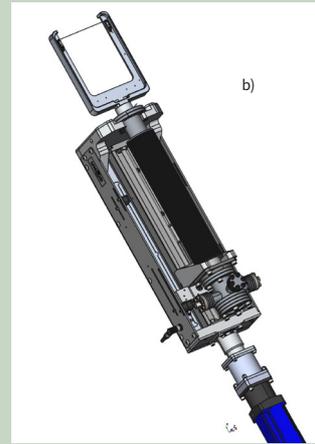
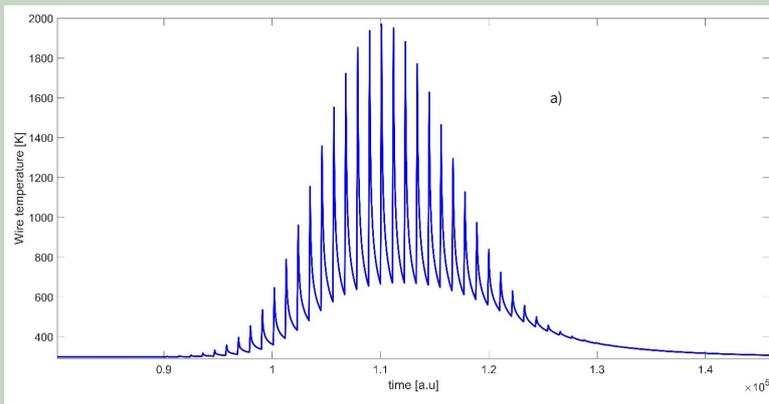


Figure 4 (Crédits : Benjamin Cheymol, LPSC, CNRS / UHV Design / Pierre-Olivier Dumont, LPSC, CNRS).

- a) Évolution de la température du fil de tungstène durant une mesure ; b) Prototype du mécanisme de profileur à fil livré ; c) Carte de pré-amplification située dans le tunnel accélérateur.

Dans le cadre de la dynamique faisceau, le pôle a fourni une expertise sur les nombreuses révisions de la structure de l'accélérateur et des études

d'erreurs, ainsi que des études détaillées des scénarii de compensation de pannes (cf. partie Fiabilité et réglage des accélérateurs).

## Le projet SPATIAL

Le pôle est impliqué dans le projet SPATIAL (Système Piloté par Accélérateur pour la Transmutation et la réduction des stockages géologiques) porté par le groupe de physique des réacteurs du LPSC et de l'équipe aval du cycle du LPC. Ce projet vise à améliorer les performances de l'accélérateur GENEPI-3C (Générateur de Neutrons Pulsé Intense) en augmentant l'intensité et la stabilité du faisceau de particules. Cette jouvence passe par le remplacement de la source d'ions duoplasmatron par une source RCE développée par le pôle et éprouvée sur l'accélérateur GENEPI-2 et l'ajout d'un hacheur de faisceau électrostatique. Cette hausse en intensité s'accompagne également de la mise à niveau des diagnostics faisceau et de l'augmentation de la capacité de refroidissement de la cible avec une refonte complète du système cible/fluide.

Afin d'intégrer la source RCE sur l'accélérateur GENEPI-3-C, une étude de dynamique faisceau a été effectuée en 2022-2023 pour optimiser le transport du faisceau dans la machine. Les paramètres de la source ont été modélisés et ajustés à partir de données obtenues avec la source caractérisée sur une ligne de

faisceau test du pôle. Ce modèle a permis d'estimer les paramètres d'entrée pour les simulations et optimisations de transport du faisceau jusqu'à la cible, tout en tenant compte des contraintes d'intégration mécanique.

Durant la même période, le pôle a étudié la possibilité d'implanter de nouveaux diagnostics dans la ligne de faisceau et défini les spécifications pour la mise à niveau des diagnostics existants.

Le développement d'un système de refroidissement de la cible, adapté au faisceau intense (4 mA), est crucial pour le projet SPATIAL. Compte tenu des fortes contraintes sur les fluides autorisés pour le refroidissement dans le réacteur (pas d'hydrogène), la refonte du système cible/fluide a démarré par un travail bibliographique. Un fluide non hydrogéné a été sélectionné et des tests fonctionnels ont été menés au LPSC pour valider son utilisation par le SERM. En parallèle, le SERM mène des études et des simulations sur le système cible/fluide pour optimiser sa géométrie et garantir ses performances. Enfin, une mise à niveau du contrôle-commande, utilisant le logiciel EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System), a été engagée afin d'intégrer les nouveaux éléments de l'accélérateur et préparer son futur remplacement.

## PERLE, Power Energy Recovery Linac for Experiments

Un accélérateur linéaire d'électrons à récupération d'énergie (Energy Recovery Linac ou ERL) exploite l'énergie des faisceaux en circulation dans la machine, après leur utilisation, pour accélérer les faisceaux suivants, nouvellement injectés dans l'accélérateur. Ce concept permet de réduire drastiquement la consommation énergétique des systèmes RadioFréquence (RF) de l'accélération et prévoit un niveau d'efficacité énergétique inédit pour la discipline, d'un intérêt particulier dans l'optique des futurs collisionneurs de

haute énergie.

Le projet PERLE ambitionne de développer un démonstrateur d'ERL multi-tours (20 mA, 250 MeV) à Orsay pour éprouver la faisabilité des ERL de forte puissance. Dans une première phase, l'accélérateur sera équipé d'une seule recirculation de faisceau. Cette construction bénéficie du support financier du CNRS via un projet à risques et à impact ERL4ALL et du projet européen iSAS. En étroite collaboration avec IJCLab sur ce projet, le pôle :

- assure la responsabilité scientifique de l'accélérateur et mène les études d'efficacité énergétique de l'accélérateur,
- coordonne le développement du « photo-gun » (canon à électrons à effet photoélectrique) qui doit produire le faisceau d'électrons, intense et adapté à l'injection dans l'anneau ERL.

## Fiabilité et réglage des accélérateurs : projet REFILL

La fiabilité est un enjeu majeur dans la perspective d'améliorer les performances, de façon pérenne, des accélérateurs de forte puissance. Afin d'optimiser le coût de fonctionnement et le rendement énergétique des machines, les exigences sur la disponibilité faisceau deviennent, et doivent être, élevées. Dans ce but, le pôle coordonne le projet de recherche REFILL (Reliability & Failure compensation methods for Linacs) soutenu par l'IN2P3. L'objectif principal de ce projet est le développement de nouvelles méthodes de réglage pour les accélérateurs de forte puissance. Il se focalise notamment sur la compensation des pannes dans les linacs (LINear ACcelerator).

Pour la résolution de ces problématiques, nous développons un code de dynamique faisceau dédié : LightWin [7]. Cet outil a notamment permis de mener des études exhaustives (60 cas de pannes) sur le linac supraconducteur de MINERVA (MYRRHA phase 1) et de confirmer la faisabilité de ce schéma de compensation [8]. Nous avons montré qu'il est possible de compenser plusieurs pannes successives

dans un linac tel que celui de MYRRHA (12 cavités sur 150) [9]. Nous avons également démontré qu'il est possible d'appliquer ces schémas de compensation de panne sur le linac supraconducteur de SPIRAL2 du GANIL. Ces travaux permettent de mettre en évidence l'impact de ces re-réglages d'accélérateur sur la stabilité du faisceau et en particulier sur l'acceptance longitudinale (figure 5).

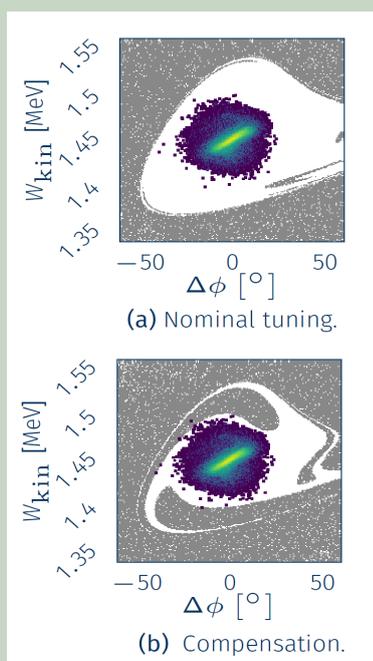


Figure 5 (extrait de [9]).

Distribution du faisceau de deuteron dans le plan longitudinal à l'entrée du linac supraconducteur de SPIRAL 2 et impact de la compensation de panne sur l'acceptance du linac.

La faisabilité technologique est aussi étudiée. Nous modélisons les systèmes de régulation des cavités accélératrices à l'aide de l'outil Matlab/Simulink. Ces modèles permettent d'optimiser les ajustements des boucles de régulation qui contrôlent le champ accélérateur et la fréquence de résonance des cavités accélératrices. Ces modèles ont été utilisés pour régler les cavités de SPIRAL2, pour le dimensionnement de système d'accord en fréquence (MYRRHA) et pour évaluer les réglages des correcteurs de boucle (PID, feedforward) nécessaires à la mise en œuvre des schémas de compensation de pannes. Ces modèles sont

également utilisés pour évaluer les phénomènes transitoires et l'efficacité de la récupération de puissance dans l'ERL du projet PERLE.

Ces outils et concepts génériques sont applicables à de nombreux accélérateurs utilisant des cavités supraconductrices. Une meilleure compréhension de la physique des faisceaux de forte intensité et des systèmes associés permettra d'anticiper sur les futurs réglages à apporter en fonction des modes de fonctionnement (courant, type de particule, mode pulsé ou continu, etc.) et d'appréhender les phénomènes transitoires, ce qui est primordial dans le cas des ERL.

## Études autour du multipactor

Le multipactor est un phénomène parasite résonant, intervenant dans les structures sous vide soumises à une onde RadioFréquence (RF). Dans le domaine des accélérateurs il peut, entre autres, empêcher l'injection de la puissance aux cavités accélératrices et aller jusqu'à causer la rupture des céramiques des coupleurs provoquant la remise à l'air de l'accélérateur.

Le pôle pilote depuis 2018 le projet de R&D de l'IN2P3 MULTIPAC (incluant l'IJCLab) qui a pour but d'étudier ce phénomène afin de le minimiser et, si possible, le faire disparaître. Dans ce cadre, un banc de test a été développé au LPSC (figure 6) et a permis de valider les simulations du multipactor modélisé par les codes PIC CST et SPARK3D. Au cours des trois dernières années, de nouveaux diagnostics ont été implantés sur le banc (par exemple, pour la mesure de l'énergie des électrons qui impactent perpendiculairement la surface). Par ailleurs, le banc a été exploité pour (1) étudier les corrélations entre le multipactor et la puissance réfléchie [10] (en collaboration avec le CEA Saclay, CEA IRFM, ONERA DPHY) et (2) pour étudier le dépôt antimultipactor de TiN réalisé avec la méthode Atomic Layer Deposition ALD (en collaboration avec le SIMaP/ INC). Ces travaux sont soutenus par le CNRS, via l'appel à projet inter-instituts « 80 primes », par l'Institut Carnot « Énergies du futur » et par des dotations projets.

Depuis 2022, le pôle participe également à l'étude de faisabilité du projet FCC (Future Circular Collider) du CERN, accélérateur de particules de près

de 100 km de circonférence pouvant atteindre une énergie de 100 TeV. Le pôle a la responsabilité du lot de tâche 8 'SupraRadioFréquence' du Masterprojet FCC NPC (Next Particle Collider), collaboration entre l'IN2P3 et le CERN. Dans ce cadre, une étude poussée du multipactor dans les cavités innovantes SWELL (Slotted Waveguide Elliptical cavity) et candidates au FCC a été réalisée [11]. Les mesures de multipactor sur les cavités SWELL au CERN sont prévues en 2025. D'autres études du multipactor et également sur la RF en général (proposées par nos collègues de l'IJCLab) sont en cours de discussion avec le CERN.

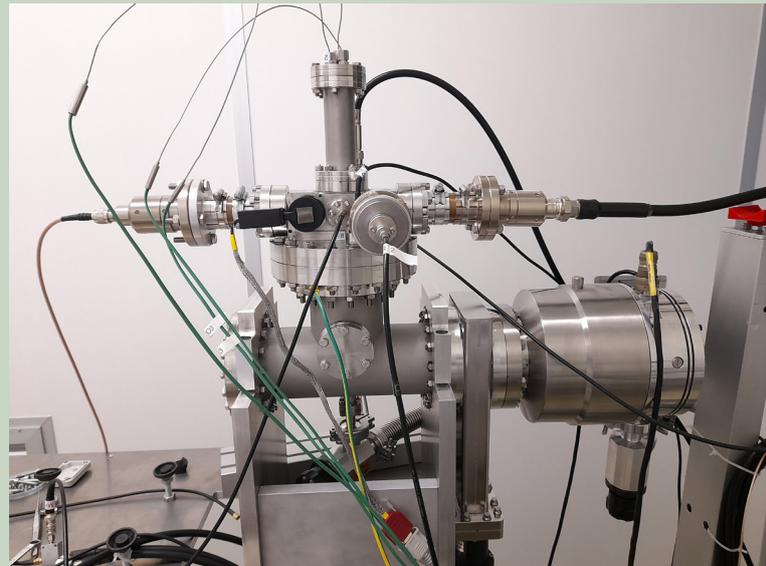


Figure 6 (Crédit : Yolanda Gomez, LPSC, CNRS).

Enceinte à vide pour les mesures du multipactor.

## POUR EN SAVOIR+

### Thèse

- Etude expérimentale des instabilités cinétiques dans le plasma chauffé à la résonance cyclotronique électronique, Bichu Subhash Bhasi Bhaskar, Thèse de l'Université Grenoble Alpes, spécialité : Physique subatomique et astroparticules, Mai 2022, <https://theses.hal.science/tel-03907385>

### Principales publications

1. Modeling the fringe field of permanent magnet multipoles using numerical simulations, T. Thuillier, T. André, and J.A. Méndez-Giono, Rev. Sci. Instrum. 91, 043305 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0008335>
2. Self-consistent Monte Carlo model for ECRIS plasma simulation, J.A Méndez-Giono et al., 2022, J. Phys.: Conf. Ser. 2244 012027. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2244/1/012027>
3. Status and prospects of the 60 GHz SEISM ion source, T. Andre et al, (2022, April). In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2244, No. 1, p. 012014). IOP Publishing, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2244/1/012014>
4. Diagnostics of charge breeder electron cyclotron resonance ion source plasma with consecutive transients method, J. Angot et al., NIM A 1062 (2024) 169174, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169174>
5. Improved Study of the Multipactor Phenomenon for the MYRRHA 80 kW CW RF Couplers, Yolanda Gómez Martínez, Patricia Duchesne, Pierre-Olivier Dumont, Noureddine Elkamchi, Christophe Joly, et al., 21st International Conference on Radio-Frequency Superconductivity, Jun 2023, Grand Rapids, United States. pp. WEPWB105, <https://hal.science/hal-04297248>
6. Double achromat solution with a dedicated collimation system for the MEBT-3 section of MYRRHA, E Traykov, E Bouquerel, Frédéric Bouly, E Froidefond, S. Chancé, et al., 14th International Particle Accelerator Conference (IPAC23), May 2023, Venice, Italy. pp.63-65, <https://hal.science/hal-04306966>
7. The LightWin code website, A. Plaçais et al., 2024, <https://github.com/AdrienPlacais/LightWin>
8. Automatic retuning of superconducting linacs using LightWin, A. Plaçais et al., in Proc. LINAC'24, Chicago, IL, USA, Aug. 2024, pp. 563-568. doi:10.18429/JACoW-LINAC2024-THXA001, <https://accelconf.web.cern.ch/linac2024/pdf/THXA001.pdf>
9. Cavity Failure Compensation Strategies in Superconducting Linacs, A. Plaçais and F. Bouly, in Proc. LINAC'22, Liverpool, UK, Aug.-Sep. 2022, pp. 552-555. doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPORI04, <https://accelconf.web.cern.ch/linac2022/papers/tupori04.pdf>
10. Mesures du multipactor en régime stationnaire et progressif, A. Plaçais et al, URSI 2024, [https://www.researchgate.net/publication/384302217\\_Traveling\\_and\\_standing\\_wave\\_multipactor\\_measurements](https://www.researchgate.net/publication/384302217_Traveling_and_standing_wave_multipactor_measurements)
11. Multipactor studies for the FCC-ee superconducting SWELL cavities, A. Placais et al. IPAC2023, <https://hal.science/hal-04306977>

### Ressources Web

- D. Ackermann et al., Livre Blanc du projet Newgain, D. Ackermann et al.: [https://www.ganil-spiral2.eu/wp-content/uploads/2021/06/Whitebook\\_NEWGAIN-1.pdf](https://www.ganil-spiral2.eu/wp-content/uploads/2021/06/Whitebook_NEWGAIN-1.pdf)
- Geller et al. (1991), "ECRIPAC: a new concept for the production and acceleration to very high energies of multiply charged ions using an ECR plasma", Proceedings of the 10th international workshop on ECR ion sources (pp. 449-451). <https://accelconf.web.cern.ch/linac2024/pdf/TUXA005.pdf>
- À la recherche du risque, Oct. 2024, <https://www.cnrs.fr/fr/actualite/la-recherche-du-risque>
- <https://isas.ijclab.in2p3.fr/>
- A. Orduz et al., "SPIRAL2 operations and future plans", in Proc. LINAC'24, Chicago, IL, USA, Aug. 2024, pp. 284-286. doi:10.18429/JACoW-LINAC2024-TUXA005. <https://accelconf.web.cern.ch/linac2024/pdf/TUXA005.pdf>
- S.A Bogacz, K.D.J André, O Brüning, B.J Holzer, B.R Hounsell, et al. 'Beam dynamics driven design of powerful energy recovery linac for experiments. Physical Review Accelerators and Beams', 2024, 27 (3), pp.031603. <https://hal.science/hal-04523882v1>

# PÔLE PLASMAS, MATÉRIAUX, NANOSTRUCTURES

Les activités de recherche du pôle portent sur le développement des technologies plasma micro-onde, allant de l'étude et de la conception de sources plasma unitaires jusqu'à la réalisation d'équipements de type prototype (comportant des chambres plasma configurées selon les applications envisagées) et à la mise en œuvre de procédés plasma. Ces activités couvrent deux principaux axes de recherche : Physique et Ingénierie des plasmas micro-onde pour des études fondamentales et des applications en volume et/ou en surface, et Physique et Ingénierie des procédés visant des applications en lien avec le domaine de l'énergie (photovoltaïque, conversion d'énergie, fusion par confinement magnétique).

## **Membres permanents**

Stéphane Béchu, Alexandre Bès, Laurent Bonny, Dominique Fombaron, Ana Lacoste (responsable du pôle).

## **Membres non permanents**

Alexandre Dieulessaint (doctorant), Zakariae En-Naji (doctorant), Quentin Gutierrez (doctorant), Maria Mitrou (doctorante).

## **Personnels des services techniques**

Romain Bourroux, Mile Kusula, Johann Menu, Sébastien Roudier, Lucie Vivargent (Service Études et Réalisations Mécaniques), Eric Lagorio, Damien Tourres (Service Électronique), Guillaume Dargaud (Service Informatique), Adeline Richard-Termini (Service Détecteurs et Instrumentation).

## Physico-chimie des plasmas $H_2/D_2$

Cette thématique, initiée en 2007, est financée par la Fédération de Recherche Fusion par Confinement Magnétique (FR-FCM) du CNRS et par EUROfusion successivement au travers des programmes « Work Package: Heating & Current Drive » et « WP24 (TRED) ». L'objectif est de définir une configuration expérimentale optimale de source d'ions négatifs  $H^-/D^-$ , sans ou à très faible apport de Cs, à haut rendement (supérieur à 60 % pour 30 % estimé actuellement) destinée au chauffage des plasmas tokamak ITER (acronyme de l'anglais International thermonuclear experimental reactor, également mot latin signifiant « chemin » ou « voie ») et DEMO (DEMONstration power plant). Ces travaux, menés sous l'égide du CEA-IRFM de Cadarache en collaboration avec l'Université de Patras, ont permis de développer des diagnostics plasma innovants et d'obtenir une vision exhaustive des espèces neutres et chargées dans ces plasmas  $H_2/D_2$ . Notamment, l'utilisation du rayonnement synchrotron sur la ligne DESIRS (Dichroïsme Et Spectroscopie par Interaction avec le Rayonnement Synchrotron) du synchrotron SOLEIL (Saint-Aubin) a mis en évidence

les interactions plasma/surfaces sur la production de molécules dans un état de vibration particulièrement favorable à la production d'ions négatifs [1,2]. Des mesures de la densité des ions négatifs  $H^-/D^-$  par photodétachement laser ont révélé l'effet isotopique et l'intérêt des plasmas pulsés pour la production de ces espèces [thèse Mitrou 2024].

Depuis 2022, en complément de la production d'ions négatifs, cette thématique s'étend à la production de molécules ro-vibrationnellement excitées dans d'autres conditions expérimentales. Ces molécules, qui jouent un rôle central dans la formation des ions négatifs, sont des candidates activement étudiées pour la limitation de la charge thermique par des mécanismes de recombinaison moléculaire activée (MAR). Un nouvel appareil expérimental, SCHEME-III (voir figure 1), a été conçu pour ces études à des pressions plus élevées ( $> 1$  Pa) dans des mélanges hydrogène/azote. Compte tenu du faible volume de couplage (tube de quartz de 4 mm de diamètre intérieur) et de la haute puissance micro-ondes injectée (200 W) la densité de puissance atteint dans le plasma produit par ce dispositif approche les conditions expérimentales régnant au voisinage du divertor :  $20 \text{ MW.m}^{-3}$ . Le divertor extrait la chaleur et les cendres produites par la réaction de fusion, minimise la contamination du plasma et protège les parois environnantes des charges thermiques et neutroniques.

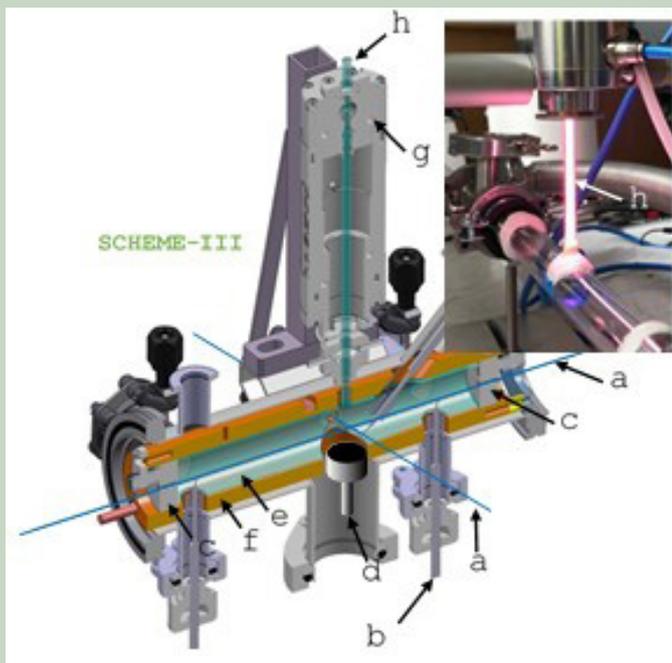


Figure 1 (Crédit : Équipe Plasmas, Matériaux & Nanostructures, CNRS).

Vue schématique de l'installation SCHEME-III. a) faisceau synchrotron ou laser pour absorption VUV ou photodétachement, b) sondes de Langmuir, c) diaphragmes, d) support d'échantillon, e) tube en quartz  $\varnothing 28$  mm, f) partie refroidie en cuivre, g) surfatron, h) tube en quartz  $\varnothing 4$  mm.

Photo en encart : plasma  $N_2$  dans un tube en quartz  $\varnothing 4$  mm.

## Technologies plasma : sources à pression intermédiaire pour application aux détecteurs à diamant

Dans le cadre du master projet DIAMANT, des membranes de 10 mm de diamètre et de 5  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en diamant polycristallin ont été réalisées pour les futurs moniteurs faisceaux à très haut flux.

Les films de diamant (figure 2 - a et b) ont été synthétisés par procédé plasma CVD (Chemical Vapor Deposition) sur une plaquette de silicium de 100 mm de diamètre en utilisant des coupleurs ProExtenD développés au LPSC [3].

Les membranes auto-suspendues (figure 2 - c) ont été obtenues par gravure chimique en phase vapeur de la face arrière (Si) avec du  $\text{XeF}_2$ , puis implémenté sur PCB (Printed Circuit Board) (figure 2 - d) pour pouvoir réaliser la collecte de charges et les tests fonctionnels en tant que détecteur intégré [4].

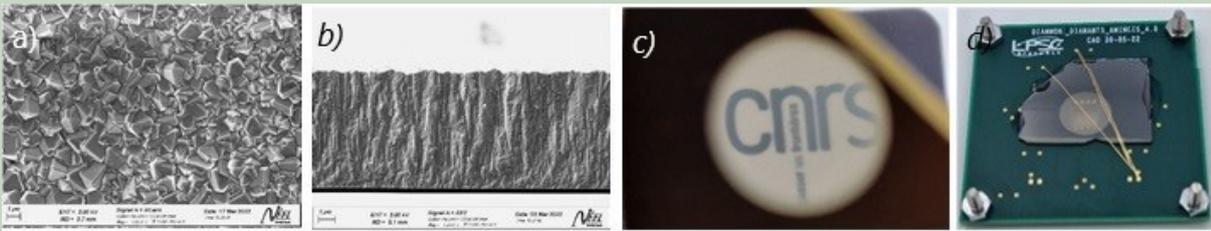


Figure 2 (Crédit : Pôle Plasmas, Matériaux & Nanostructures, CNRS).

Dépôt de diamant polycristallin sur plaquette de Si  $\varnothing 100$  mm  
a) vue de dessus, b) vue de côté, c) membrane transparente et d) intégration sur PCB.

## Technologie hybride pour le dépôt en film mince sans dommage ionique. Application au photovoltaïque

Dans le cadre de la collaboration avec le CEA-INES, une technique innovante [5] a été développée en 2019 pour le dépôt d'oxydes transparents conducteurs (OTC) utilisés comme électrodes transparentes pour cellules photovoltaïques (PV) à haut rendement, telles que les cellules à hétérojonction (HET) silicium

amorphe hydrogène/silicium cristallin (a-Si:H/c-Si) ou à pérovskites.

Cette technique innovante hybride d'évaporation assistée par un plasma micro-onde RCE (résonance cyclotron électronique) a été optimisée. En effet, l'applicateur micro-onde, utilisé pour la validation de la preuve de concept (rendement de 23,9 % sur cellule HET), nécessitait une rotation de la cellule pendant le dépôt et afin d'optimiser l'uniformité azimutale du plasma et, donc, l'uniformité du dépôt, l'applicateur a été intégralement revu pour fonctionner à 915 MHz (figure 3 - b) et non à 2,45 GHz fréquence de fonctionnement initiale (figure 3 - a). Les caractérisations plasmas montrent une homogénéité accrue. Les tests sur cellules PV sont en cours.

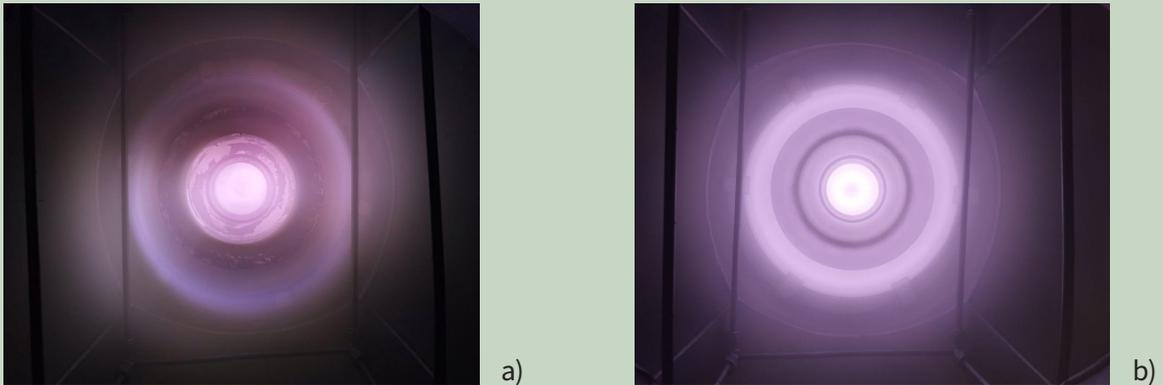


Figure 3 (Crédit : Pôle Plasmas, Matériaux & Nanostructures, CNRS).

Applicateurs micro-ondes, 1 mTorr Ar, 300 W : a) configuration 2,45 GHz, b) configuration 915 MHz.

## Technologie hybride à cathode micro-onde. Application à l'éclairage

Dans le cadre du projet ANR2020 – ADELIN (2020-2024) le pôle a développé une nouvelle génération de lampe [6] basse consommation avec décharge fluorescente sans mercure et sans impact négatif pour l'environnement. Celle-ci repose sur un concept original où un plasma de colonne positive DC est soutenu par une cathode micro-onde [7]. En effet, l'utilisation d'une cathode micro-onde permet l'emploi d'additifs comme le soufre ou les mélanges  $N_2-O_2$ , autrement exclus dans les lampes fluorescentes actuelles. Pour déterminer l'efficacité lumineuse des dispositifs étudiés (lampes), des luminophores développés par l'Institut de Chimie de Clermont-Ferrand optimisés pour les nouveaux additifs émetteurs ont

été utilisés. L'étude de mélanges réactifs a clairement démontré l'avantage du mélange  $Ar-S_2$  sur le mélange  $Ar-N_2/O_2$ . Cet avantage résulte d'une meilleure répartition spectrale de l'émission pour  $Ar-S_2$  avec un impact avantageux, d'une part, sur le rendement énergétique d'émission de la décharge dans le domaine UV+Visible (émission IR réduite) et, d'autre part, sur le rendement de conversion par les luminophores. Un mélange approprié de luminophores d'absorption UV a permis l'élaboration d'un dispositif de lampe (décharge HF à onde de surface en tube scellé) avec des performances visuelles proches de celles des lampes commerciales  $Ar-Hg$ .

## POUR EN SAVOIR+

### Thèses et HDR

- « Étude des mécanismes de production d'ions négatifs d'hydrogène (H<sup>-</sup>) et de deutérium (D<sup>-</sup>) en plasmas micro-onde continu et pulsé par des diagnostics complémentaires », Maria Mitrou, co-tutelle UGA- Université de Patras (Grèce), 2024, <https://theses.hal.science/tel-04812766>
- « Nouvelle technologie de lampe fluorescente à colonne positive hybride, initiée à la cathode par plasma à onde de surface, et émetteurs UV moléculaires S2 et N2/O2 en remplacement du mercure. Caractérisation des performances d'éclairage des prototypes de lampes avec luminophores dédiés », Quentin Gutierrez, LPSC (financement ANR ADELIN), 2024, <https://theses.hal.science/tel-04810330>
- « Étude des défauts liés à l'hydrogène dans les nanofils de ZnO obtenus par croissance en bain chimique », Alexandre Dieulesaint, LMGP, 2023, <https://theses.fr/2023GRALI101>

### Principales publications

1. Direct measurements of electronic ground state ro-vibrationally excited D<sub>2</sub> molecules produced on ECR plasma-facing materials by means of VUV-FT absorption spectroscopy, Béchu S., Lemaire J. L., Gavilan L., Aleiferis S., Shakhmatov V., Lebedev Y. A., Fombaron D., Bonny L., Menu J., Bès A., Svarnas P., De Oliveira N, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 257, 107325. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107325>
2. Latest experimental and theoretical advances in the production of negative ions in cesium-free plasmas, Taccogna F., Bechu S., Aanesland A., Agostinetti P., Agnello R., Aleiferis S., Angot T., Antoni V., Bacal M., Barbisan M., Bentounes J., Bès A., Capitelli M., Cartry G., Cavenago M., Celiberto R., Chitarin G., Delogu R., De Lorenzi A., Veltri P., The European Physical Journal D 2021 75:8, 75(8), 1–34. <https://doi.org/10.1140/EPJD/S10053-021-00228-Y>
3. Applicateur d'onde haute fréquence, coupleur et dispositif associés pour la production d'un plasma, A. Lacoste, A. Bès, ES 605774, 08 avril 2018 et Brevet FR 2001952, 27 février 2020. <https://data.inpi.fr/brevets/EP4111831>
4. Performance of CVD diamond detectors for single ion beam-tagging applications in hadrontherapy monitoring, S. Curtoni, M.-L. Gallin-Martel et al., NIMA Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, volume 1015, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165757>
5. Dispositif de dépôt en film mince par évaporation assistée par plasma micro-onde, A. Lacoste, A. Bès, F. Ozane, FR 2013733, 18 décembre 2020. <https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?docId=WO2022129799>
6. Positive columns sustained jointly by microwaves and DC voltages for lighting applications: experimental results in pure argon, J. Pelletier, P. Baële, A. Lacoste, J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab2d12>
7. Hybrid discharge for low consumption, mercury-free fluorescent lamps, Q. Gutierrez, EEDAL – LS 17 joint conference, June 1st-3rd 2022, Toulouse, France
8. Magnesium hydride films deposited on flexible substrates: Structure, morphology and hydrogen sorption properties, H. le Quoc, M. Coste, A. Lacoste, L. Laversenne, Journal of Alloys and Compounds 955 (2023) 170272 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170272>
9. Thin films as model system for understanding the electrochemical reaction mechanisms in conversion reaction of MgH<sub>2</sub> with lithium, N. Berti, E. Hadjixenophontos, F. Cuevas, J. Zhang, A. Lacoste, P. Dubot, G. Schmitz, M. Latroche, Journal of Power Sources Volume 402, 31 October 2018, Pages 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.09.033>
10. Effect of Highly Ordered Pyrolytic Graphite Surfaces on the Production of H<sup>-</sup> Negative Ions in ECR-Driven Plasmas, J. Bentounes, S. Béchu, P. Svarnas, A. Bès, D. Fombaron, L. Bonny, A. Lacoste, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 52, no. 2, pp. 407-414, Feb. 2024. <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3358586>

### Ressource web

- [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=275](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=275)



# LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MODANE

The background of the page is a solid dark blue color. Overlaid on this background are numerous thin, white, wavy lines that create a sense of motion and depth. These lines are arranged in a pattern that resembles a grid or a series of overlapping waves, with some lines curving and intersecting to form a complex, organic shape that flows across the page.

Créé en 1981, le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) est le laboratoire souterrain le plus profond d'Europe. Le LSM est une plateforme nationale française du CNRS/IN2P3 dédiée au développement des programmes de recherche en astroparticules et en physique nucléaire et rattachée au Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie de Grenoble depuis 2019. Le LSM est un laboratoire souterrain d'accès facile, permettant un programme scientifique de classe mondiale actuellement axé sur les neutrinos et la matière noire, mais qui s'étend pour inclure une base scientifique plus large.

Protégé par 1700 m de roches, au milieu du tunnel autoroutier du Fréjus, le LSM offre un environnement expérimental caractérisé par l'un des plus faibles taux de radioactivité naturelle au monde. Ces conditions uniques permettent aux expériences scientifiques hébergées de rechercher des phénomènes physiques extrêmement rares. Ce site souterrain regroupe deux installations : une plateforme d'accueil d'expériences scientifiques, définies dans le cadre de collaborations internationales, qui occupe environ 400 m<sup>2</sup> au sol ; et une plateforme technologique de spectroscopie gamma de 50 m<sup>2</sup>, principalement dédiée à l'étude et à la validation des matériaux d'ultra basse radioactivité qui doivent être mis en œuvre dans la construction des expériences de recherche fondamentale parallèlement aux activités de recherche en géosciences et en biologie.

Le LSM accueille des expériences de physique fondamentale dans les domaines de la détection directe de la matière noire et de la détermination de la nature du neutrino, enjeux scientifiques majeurs de la communauté internationale pour les prochaines années. Il est également ouvert aux communautés des géosciences et de la biologie, qui trouvent au LSM une plateforme unique pour les mesures d'identification et de datation (géosciences, chrono-sciences) et pour l'étude du comportement cellulaire dans un environnement d'ultra-basse radioactivité (conservation de

cellules souches, effets de faibles doses, etc.).

Dans le but d'inspirer les générations de futurs scientifiques, le LSM a développé un musée dans le bâtiment de surface pour renforcer les activités de communication et de sensibilisation. Cet espace muséographique, animé par le personnel du LSM, est soutenu activement par les collectivités locales. Il accueille chaque année une dizaine de classes des établissements scolaires de la région ce qui contribue fortement à l'éveil scientifique des élèves, auxquels on peut ajouter environ 650 visiteurs/an (tourisme scientifique).

# LA PLATEFORME NATIONALE LSM

Le LSM collabore avec d'autres laboratoires souterrains européens dans le cadre de développements technologiques des infrastructures. Le LSM participe au réseau informel DULIA, formé par les laboratoires LSM, LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italie), LSC (Laboratorio Subterraneo de Canfranc, Espagne) et Boulby (Boulby Underground Laboratory, Royaume-Uni). Ce réseau organise des ateliers sur des thématiques liées aux domaines de recherche de ces laboratoires. Le réseau travaille à formaliser la coordination entre ses partenaires au niveau européen. Afin de consolider les échanges d'informations et la coordination entre les laboratoires souterrains profonds dans le domaine de la physique fondamentale, le Conseil Stratégique Externe (CSE) du LSM comprend actuellement des (anciens) membres de la direction des laboratoires souterrains LNGS, Boulby et SNOLAB. Dans la période 2022-2024, le LSM a participé à deux appels européens : e-COST et INFRA-DEV.

## **Membres permanents**

Ali Dastgheibi-Fard, Valérie Favre, Jean-Louis Margueron, Christian Ranieri, Aurélien Rojas, Nadine Sauzet (responsable opérationnelle), Silvia Scorza (directrice scientifique), Guillaume Warot (chef du Service Ultra Basse Radioactivité), Thierry Zampieri.

## **Membre non permanent**

Eric Pailla.

## Les propriétés des neutrinos

La découverte de la double désintégration bêta sans neutrino ( $0\nu 2\beta$ ) remodelerait notre compréhension fondamentale des neutrinos et de la matière dans l'Univers. Les expériences de recherche de  $0\nu 2\beta$  testent l'existence d'une symétrie fondamentale de la Nature associée au nombre leptonique, sondent la nature quantique des neutrinos et permettent de mesurer leur masse effective (unique moyen pratique de démontrer si les neutrinos sont leurs propres antiparticules, c'est-à-dire si les neutrinos ont une masse de Majorana). La découverte des neutrinos de Majorana ouvrirait la porte à une nouvelle physique au-delà de la découverte de l'oscillation des neutrinos et signifierait un changement de paradigme dans notre compréhension des origines de la masse et de la matière. Une masse non nulle du neutrino aurait un impact sur l'évolution de l'Univers depuis le début des temps jusqu'à la formation de structures à grande échelle à l'époque actuelle, et les neutrinos de Majorana joueraient un rôle clé dans les scénarios viables qui expliquent l'asymétrie matière-antimatière dans notre Univers.

SuperNEMO [1] est une expérience de détection de double désintégration  $\beta$  sans neutrino de la collaboration Neutrino Ettore Majorana Observatory (NEMO) faisant suite à l'expérience NEMO3 qui a effectué une prise de donnée au LSM de 2005 à 2010. Le

démonstrateur SuperNEMO, actuellement en cours d'installation au LSM, consiste à valider le concept d'un détecteur modulaire, et donc extensible, avec la construction et la mise en œuvre d'un premier module au LSM. La détection de ces événements extrêmement rares est basée sur un double détecteur de type trajectographe-calorimètre prenant en sandwich une fine couche d'isotope émetteur  $\beta\beta$ , ce qui permet de reconstruire la trajectoire tridimensionnelle ainsi que l'énergie des particules chargées émises. L'installation de cette expérience a commencé en 2015. Le démonstrateur SuperNEMO est en phase finale d'intégration, avec l'installation des blindages (voir figure 1) et du système de recyclage du mélange gazeux, pour une mise en service programmée en 2025.

Le projet BINGO [2] (Bi-Isotope  $0\nu 2\beta$  Next Generation Observatory), financé par le Conseil Européen de la Recherche (ERC), est dédié à l'exploration de nouvelles méthodes de réduction du bruit de fond dans les expériences de recherche de désintégration  $0\nu 2\beta$ . Il se concentre sur le développement de technologies innovantes pour minimiser le bruit de fond. Le démonstrateur BINGO, appelé MINI-BINGO, sera composé de cristaux de  $\text{Li}_2\text{MoO}_4$  et  $\text{TeO}_2$  couplés à des détecteurs de lumière bolométriques conçus pour étudier les isotopes prometteurs de double désintégration bêta  $^{100}\text{Mo}$  et  $^{130}\text{Te}$ . Cela permettra de rejeter un fond significatif dans les bolomètres causé par une contamination de surface par des radionucléides  $\alpha$ -actifs au moyen d'une sélection de rendement lumineux. Pendant la période 2022-2024 le LSM a intégré le démonstrateur MINI-BINGO en souterrain, avec une validation du cryostat lors de la première mise en froid à l'été 2024.



Figure 1 (Crédit : LPSC,CNRS).

Installation du blindage en fer pour protection contre la radiation gamma.



Figure 2 (Crédit : LPSC,CNRS).

Installation du cryostat de BINGO dans son chassis anti-vibration.

# La matière noire légère

L'origine de la matière noire reste aujourd'hui encore inconnue. Elle pourrait correspondre à une nouvelle particule, ou encore à des objets astrophysiques massifs tels que des trous noirs primordiaux. Dans le cas le plus général, si l'on fait la seule hypothèse que la matière noire est une particule élémentaire, sa masse pourrait prendre des valeurs de  $10^{22}$  eV/c<sup>2</sup> (contraint par la taille des galaxies naines) à la masse de Planck (limite d'une particule élémentaire). Cela correspond à un intervalle en masse de 50 ordres de grandeur, très largement inexploré aujourd'hui. Le LSM héberge actuellement deux expériences de matière noire et se prépare pour l'accueil d'une nouvelle expérience.

L'expérience DAMIC-M [3] (DARk Matter In CCDs at Modane) utilise des dispositifs à couplage de charge (CCD) en silicium pour rechercher des particules de matière noire avec une exposition cible de 1 kg-an. Elle est financée en grande partie par l'ERC et par la National Science Foundation (NSF). Un nouveau système de lecture de type skipper implémenté dans les CCD fournit une résolution à un seul électron grâce à de multiples mesures non destructives de la charge de chaque pixel, poussant le seuil de détection à l'échelle de l'eV. DAMIC-M fera progresser de plusieurs ordres de grandeur l'exploration de l'hypothèse des particules de matière noire. En effet, DAMIC-M recherchera des WIMP de faible masse (<5 GeV/c<sup>2</sup>) grâce au recul nucléaire qu'ils induiraient sur les noyaux de silicium mais sondera également des candidats beaucoup plus légers tels que les particules du secteur caché grâce au recul électronique qu'ils provoqueraient. DAMIC-M, dans sa phase finale, comprendra 52 modules CCD pour une masse cible totale d'environ 700 grammes et un objectif de fond radioactif inférieur à 1 événement/keV/kg/jour. L'installation de DAMIC-M au laboratoire souterrain de Modane en France commencera en 2025. Un prototype, la Low Background Chamber (LBC), avec 20 g de CCD Skipper à faible bruit de fond, a été installé et mis en service avec succès en 2022 au LSM (voir figure 2), il donne déjà des résultats de premier plan dans la recherche de matière noire leptophile.

La détection directionnelle de matière noire (DDM) peut ouvrir une nouvelle signature pour les particules faiblement massives en interaction. La signature directionnelle offre en outre un moyen unique de

surmonter les bruits de fond des neutrons et des neutrinos. Afin d'obtenir la signature directionnelle, les détecteurs DDM doivent être sensibles aux reculs nucléaires de faible énergie dans la gamme des keV avec des traces associées d'une résolution angulaire inférieure à 20°. Le détecteur MIMAC est constitué d'une matrice de micro-chambres à projection temporelle (TPC) développées au LPSC (cf. § MIMAC).

TESSERACT [4] est une collaboration franco-américaine soutenue par le CNRS/IN2P3 et la DoE (Department of Energy) qui se propose de bâtir un programme de recherche de rupture, avec un changement de paradigme vis-à-vis de l'état de l'art actuel. En effet, ce programme vise la détection de la matière noire sur 12 ordres de grandeur en masse, allant de la fraction d'électronvolt à la masse du proton, ce qu'aucune autre expérience ne peut faire à ce jour. Pour cela, TESSERACT met en œuvre l'usage de matériaux cibles de détecteurs différents, afin de sonder tout type d'interactions, et des nouvelles technologies de détecteurs cryogéniques ultra-sensibles et innovants. C'est dans ce cadre qu'un projet affilié, TES4DM, va s'installer au LSM dans les années qui viennent (dont une première phase du projet a été initiée dans les locaux du LPSC en 2024) et en y intégrant sa technologie de détecteurs cryogéniques en Ge et Si pour laquelle elle a acquis une expertise mondialement reconnue. Enfin, et dans un axe plus transverse, la technologie de détecteur de TES4DM permettra d'ouvrir la voie à l'étude des réactions au sein des réacteurs nucléaires, mais aussi à la non-prolifération de matériaux fissiles.



Figure 3 (Crédit : U. Chicago).

Montage du blindage plomb autour du cryostat en cuivre du démonstrateur LBC (Low Background Chamber) au LSM. Le blindage neutronique en polyéthylène est aussi partiellement monté. Tous les éléments du blindage ont été réceptionnés à Grenoble pour y être nettoyés chimiquement en salle blanche avant leur transfert à Modane. L'intérieur du cryostat est lui aussi blindé avec du plomb archéologique, le détecteur démonstrateur est constitué de deux CCD de 4x4 cm<sup>2</sup>.

## Développements technologiques

Le LSM est par ailleurs engagé dans deux développements technologiques : d'une part l'usine anti-radon qui fournira de l'air déradonisé aux expériences, et d'autre part, les mesures de bruit de fond ultra-faible, notamment via la spectrométrie gamma HPGe.

### Fourniture d'air déradonisé

Avec une roche dont l'activité moyenne est d'environ 10 Bq/kg et une ventilation de 5000 m<sup>3</sup>/h, la concentration en Rn au LSM est d'environ 15 Bq/m<sup>3</sup>. De 2004 à 2014, une usine anti-radon développée par ATEKO (République tchèque) a fonctionné au LSM. Le débit d'air était de 120 m<sup>3</sup>/h et la concentration en radon en sortie, de 10 à 15 mBq/m<sup>3</sup>. À court terme, le LSM prévoit l'installation d'une nouvelle usine anti-radon, composée d'une colonne de 650 kg de charbon actif à -50 °C. Une première version du système sera mise en service en janvier 2025 avec les équipements livrés par ATEKO. A terme, l'objectif est d'atteindre un débit d'air d'environ 250 m<sup>3</sup>/h pour une concentration en radon réduite à 10 mBq/m<sup>3</sup>. Cette installation est indispensable pour les expériences en cours installées au laboratoire souterrain, afin de garantir une faible concentration de Rn dans l'air autour des détecteurs. Elle permettra également de réaliser le montage des prochaines expériences dans un environnement à faible concentration en Rn.

Bien que la mesure du radon soit généralement peu sensible à la radioactivité externe, en particulier pour les détecteurs à diffusion électrostatique, une mesure extrêmement sensible pourrait bénéficier de l'environnement à très faible bruit de fond du LSM, à la fois en termes de réduction du bruit de fond et d'optimisation de l'efficacité. Le développement de la métrologie du radon en sous-sol au LSM est essentiel, et sera exploré prochainement.

### Plateforme de caractérisation de matériaux

Le LSM héberge un ensemble de détecteurs en germanium hyper pur (HPGe) dédiés aux mesures de spectroscopie gamma. Ces mesures permettent la caractérisation des matériaux utilisés pour les expériences de physique souterraine (cibles de détection et matériaux de blindage), d'échantillons environnementaux, de volcanologie et de sédiments. Ces mesures sont réalisées au travers de collaborations

avec des instituts externes (IRSN, INEE et INSU).

L'optimisation de l'implantation des détecteurs Germanium de la plateforme de spectrométrie gamma du LSM était nécessaire afin de pouvoir accueillir sur une surface réduite 22 détecteurs au lieu de 16. Ainsi, le projet PARTAGe, financé par l'IDEX, l'UGA, la région AURA, le département de Savoie et TELT (Tunnel Euroalpin Lyon Turin) à travers la "Démarche Grand Chantier" a démarré en 2019 après quelques années de préparation. Le principe de PARTAGe est de disposer les détecteurs sur deux rangées dans un blindage commun afin d'optimiser l'espace et la quantité de plomb utilisée. En juin 2022, les modules constituant la première ligne de 16 détecteurs "standards" ont tous été livrés et installés au LSM (voir figure 3). La deuxième ligne de 6 détecteurs est dans l'attente de la livraison du blindage interne en plomb archéologique, attendue en janvier 2025. De plus, le LSM organise et accueille une réunion annuelle avec la communauté des utilisateurs Germanium dans un processus d'amélioration continue des mesures.

Afin d'étendre les mesures de faible bruit de fond aux caractérisations des alphas de surface, le LSM a fait l'acquisition d'un compteur alpha XIA UltraLo-1800 dont la caractérisation en surface est effectuée au LPSC depuis l'été 2024, avant son installation en souterrain à l'été 2025.



Figure 5 (Crédit : LPSC,CNRS).

Première ligne de détecteurs du projet PARTAGe. Seize détecteurs sont installés dans leur blindages plomb circulaires. Les blindages sont constitués de 20 cm de plomb faible-activité et d'une couche interne de 5 cm de plomb "archéologique" ou de cuivre.

# Focus interdisciplinaire du LSM

Suite à une recommandation du CSE du Laboratoire Souterrain de Modane en 2022, le LSM a organisé un atelier pour promouvoir et valoriser les activités interdisciplinaires qu'il réalise.

L'atelier interdisciplinaire s'est déroulé les 18 et 19 octobre 2023 au LSM. Il a produit un rapport qui a été communiqué aux directions du LSM, du LPSC et de l'IN2P3. Un directeur/représentant de la plupart des laboratoires souterrains du monde entier a été invité à présenter le programme interdisciplinaire de leur laboratoire. Un comité scientifique a été mis en place pour diriger le plan stratégique des activités interdisciplinaires du LSM pour les 7 à 10 prochaines années. L'atelier a permis d'identifier deux défis scientifiques et deux défis techniques que le LSM pourrait relever pour renforcer ses activités de recherche interdisciplinaires. Les défis scientifiques se situent autour de la biologie, des applications médicales et des activités de détection cryogénique, le LSM accueillant déjà des expériences biologiques sous terre. Concernant le développement des détecteurs cryogéniques, il est envisagé d'établir une

synergie entre la recherche en informatique quantique et les recherches sur la matière noire légère. Les défis technologiques se concentrent quant à eux sur la réduction du bruit de fond radioactif et les mesures de bruit de fond ultra-faible pour évaluer la contamination radioactive gamma dans les matériaux. En effet, la contamination au radon est une contamination particulièrement limitante pour les expériences souterraines d'astroparticules et de physique nucléaire. Les descendants du  $^{222}\text{Rn}$  émis dans l'atmosphère sont chargés électriquement et peuvent se coller aux surfaces des détecteurs avec une probabilité relativement élevée de rester fixés. Ils se désintègrent ensuite en  $^{210}\text{Pb}$  à longue durée de vie, un émetteur bêta de faible énergie, puis en  $^{210}\text{Po}$  à émission alpha, sans signature de radioactivité pénétrante. Il est essentiel de minimiser le nombre d'événements de fond résultant des particules alpha émises par la radioactivité naturelle dans les matériaux utilisés pour construire les expériences. Le contrôle de la contamination induite par le  $^{222}\text{Rn}$  et ses descendants dans l'environnement où les détecteurs sont assemblés et stockés est donc un enjeu crucial.

À l'avenir, le LSM prévoit également quelques activités multidisciplinaires pour lesquelles il agira en tant que laboratoire d'accueil, telles que le développement de la surveillance sismique et les activités d'horloge atomique (consortium AQUA).

## POUR EN SAVOIR+

### Chiffres clés

Profondeur du laboratoire souterrain : 1700 m (4800 m équivalent eau)

Taux de muons cosmiques : 4 muons/m<sup>2</sup>/jour

Concentration de radon : 15 Bq/m<sup>3</sup>

Surface utile pour la science : 600 m<sup>2</sup>

### Ressources Web

1. <https://supernemo.org/>
2. [https://bingo\\_extra.cea.fr/](https://bingo_extra.cea.fr/)
3. <https://damic.uchicago.edu/>
4. <https://tesseract.lbl.gov/>

# PLATEFORMES ET INSTALLATIONS TECHNIQUES



Les plateformes de recherche du laboratoire sont des dispositifs à vocation pérenne qui reposent sur des moyens spécifiques, des équipements lourds ou mi-lourds, et mobilisent des personnels hautement qualifiés pour leur mise en œuvre. Elles constituent un investissement stratégique à long terme, sont des vitrines de la recherche et développement du laboratoire, et jouent un rôle clé dans la visibilité et l'attractivité de nos activités de recherche. Elles sont des lieux privilégiés de développement d'expertises techniques et méthodologiques spécifiques, favorisant l'émergence de nouvelles approches et d'innovations technologiques.

Leur fonctionnement repose sur une forte interaction entre les chercheurs et les ingénieurs et techniciens du laboratoire, une synergie essentielle à la conception, l'optimisation et l'exploitation de ces équipements.

Au-delà de leur contribution aux projets de recherche en cours, ces plateformes préparent les avancées de demain en structurant les compétences et les moyens technologiques nécessaires aux futures contributions du laboratoire. Elles offrent également un cadre propice à des collaborations extérieures avec d'autres laboratoires, des partenaires institutionnels et industriels, renforçant ainsi la valorisation et le rayonnement des développements techniques issus du laboratoire.



# LA PLATEFORME NEUTRONIQUE GENESIS

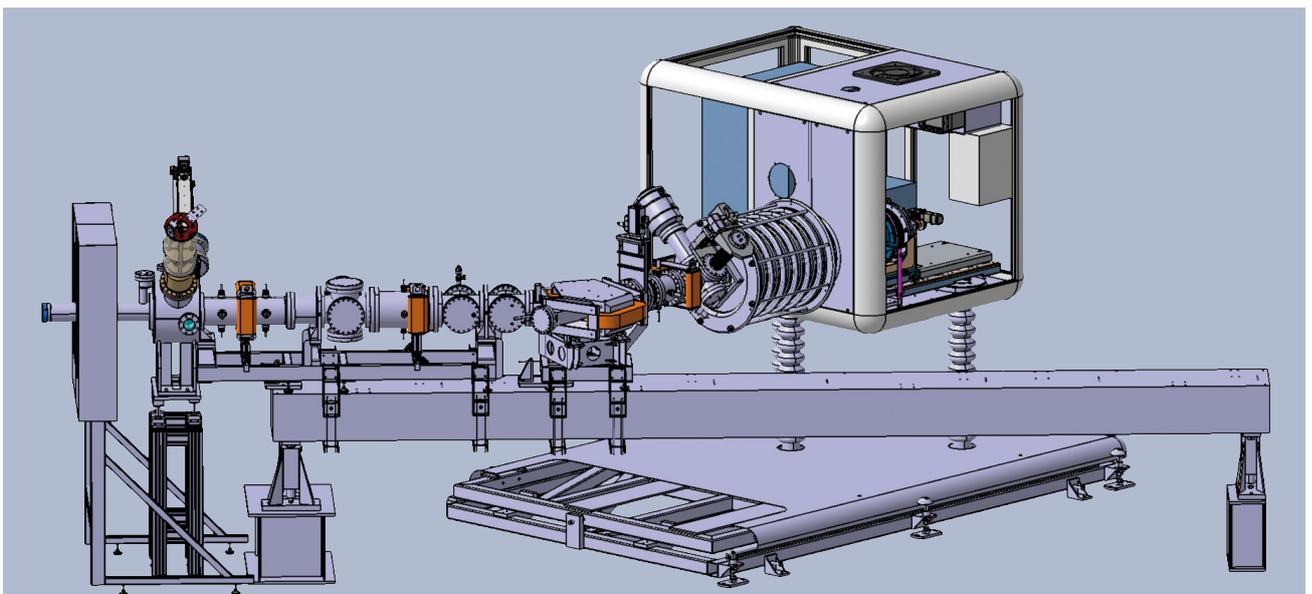
## Personnel impliqué

Maud Baylac, Benjamin Cheymol, Thomas Gemond, Etienne Labussière, Christophe Peaucelle, Antoine Protin, Solenne Rey (Pôle Accélérateurs et Sources d'Ions), Joël Bouvier, Damien Tourres (Service Électronique), Guillaume Dargaud (Service Informatique), Pierre Olivier Dumont, Julien Giraud, Florian Kiener, Mile Kusulja, Sébastien Roudier, le personnel de l'atelier de fabrication (Service Études et Réalisations Mécaniques), Mathieu Da Silva, Julien Marpaud (Service Détecteurs et Instrumentation), William Regairaz (Service Sécurité et Radioprotection), Annick Billebaud, Olivier Méplan, Mourad Ramdhane (Groupe Physique des Réacteurs).

La plateforme GENESIS GEnerator of NEutrons for Science and IrradiationS, labellisée IN2P3, a en charge l'exploitation et la mise à disposition des utilisateurs de la source de neutrons intense GENEPI2 du LPSC. Cet accélérateur électrostatique produit des neutrons de 14 MeV, par interaction de deutons avec une cible de Tritium.

Au cours de ces dernières années, l'activité de la plateforme a connu une hausse significative en matière d'irradiation, notamment auprès d'acteurs

industriels. La plateforme GENESIS a également accueilli au cours de ces dernières années plusieurs équipes de recherche du LPSC désirant soumettre leurs détecteurs à un flux intense de neutrons rapides, notamment les projets RICOCHET et MIMAC-FastN, ainsi que d'une équipe du CEA pour le projet ALDEN. A noter aussi que des tests sur des détecteurs de neutrons en Carbone de Silicium (SiC) développés par l'Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence (IM2NP) et le CEA se sont poursuivis.



(Crédit: Florian Kiener, LPSC, CNRS).

Vue schématique de l'accélérateur électrostatique de la source de deutons jusqu'à la cible. Au cours des dernières années, un effort particulier a été mis sur la caractérisation du faisceau afin d'optimiser les performances de l'accélérateur et de préparer un projet d'augmentation de flux. Pour cela une chambre de diagnostics a été conçue et installée sur la ligne afin de permettre de mesurer les paramètres faisceaux avec précision, tels que le courant à l'aide d'une coupe Faraday, et les profils transverses avec un wire scanner. Un modèle 3D a aussi été implémenté sous CATIA pour une meilleure intégration mécanique de futurs développements. Ces réalisations ont permis une meilleure compréhension de l'interaction entre le faisceau et la cible.

La collaboration avec le laboratoire TIMA (Techniques de l'Informatique et de la Microélectronique, pour l'Architecture des systèmes intégrés, laboratoire CNRS-UGA, UMR 5159) pour l'irradiation de circuits électroniques, entamée en 2013, s'est poursuivie et renforcée.

Depuis l'ouverture de la plateforme aux partenaires industriels en 2015, le succès de l'activité de valorisation de GENESIS ne s'est pas démenti, montrant notamment la pertinence de l'offre de la plateforme

face aux besoins de tests de composants microélectroniques sous flux de neutrons rapides. Ainsi des PME du bassin grenoblois et des entreprises internationales ont poursuivi depuis lors leur partenariat avec le LPSC.

Un programme important de mise à jour du contrôle commande de l'accélérateur a été initié au cours de l'année 2023 et plusieurs prototypes ont pu être testés à la fois sur banc et sur l'accélérateur. Ce travail se poursuivra au cours des prochaines années.

## POUR EN SAVOIR +

### Chiffres clés

La plateforme GENESIS est la source de neutron 14 MeV la plus intense de France et parmi les plus intenses d'Europe avec une production de  $8 \cdot 10^9$  neutrons par seconde.

La plateforme est ouverte aux utilisateurs environ 180 jours par an avec un taux d'occupation de plus de 70 % par an.

### Ressource Web

- [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=1378](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=1378)

# PLATEFORME FEST

## (FLUIDS EXPERIMENTS AND SIMULATIONS IN TEMPERATURE)

### Personnel impliqué

Nicolas Capellan, Véronique Ghetta, Pablo Rubiolo (Équipe Physique des Réacteurs), Julien Giraud, Samuel Roni (Service Etudes et Réalisations Mécaniques), Julien Marpaud, Murielle Rousseau (Service Détecteurs et Instrumentation).

La plateforme FEST comprend plusieurs installations dédiées aux études expérimentales mettant en jeu des fluides caloporteurs à moyenne ou haute température, tels que des sels fondus ou des métaux liquides. Les expériences réalisées à FEST s'inscrivent dans le cadre des recherches liées au développement de nouvelles technologies pour la production d'énergie nucléaire, la propulsion nucléaire spatiale et les applications médicales. Les systèmes étudiés sont complexes, impliquant, dans la plupart des cas, des réactions nucléaires dans des milieux fluides ou solides, accompagnées de transferts d'énergie et de masse, de changements de phase et de réactions chimiques. Les activités de la plateforme FEST reposent sur deux volets indissociables :

- des développements numériques multiphysiques et multi-échelle : ces outils sont seuls capables de prendre en compte la totalité des phénomènes physiques impliqués (cf. partie «Groupe Physique des Réacteurs»).
- des développements expérimentaux : ces travaux visent à valider certains aspects des modèles numériques sur des phénomènes (tels que la turbulence, les effets radiatifs, la solidification, la convection naturelle, la migration d'un gaz entre la phase liquide et des bulles au sein d'un écoulement diphasique, etc.) et des composants (tels que des caloducs, des convertisseurs thermoélectriques, etc.). Mais également à mettre en évidence des processus spécifiques et à développer un savoir-faire dans la mise en œuvre d'installations utilisant des fluides modèles non actifs.

Les installations sont entièrement conçues et construites au laboratoire. Leur conception s'appuie sur des simulations numériques thermiques et hydrauliques préalables, réalisées par le Service Etudes et Réalisations Mécaniques et l'équipe de Physique des Réacteurs. Avant la réalisation des installations à l'échelle 1 et en conditions réelles avec les fluides dédiés, des études préliminaires sont menées sur des maquettes en eau. Ces études permettent de valider la conception de certaines pièces, d'obtenir des mesures du champ de vitesse du liquide par PIV (Vélocimétrie par Images de Particules), et de tester le système de contrôle et de pilotage de l'ensemble de l'installation.

Dans le cadre du projet européen SAMOSAFER (2019-2023), des études expérimentales et numériques ont été menées sur la conception de systèmes de circulation naturelle pour les réacteurs à sels fondus, offrant des possibilités de sûreté passive (thèse de J. Narvaez, en collaboration avec le Politecnico di Milano). Une nouvelle expérience, intitulée «Flat Cavity Experiment», a été construite en 2023 pour étudier les instabilités thermo-convectives de Rayleigh-Bénard. Des campagnes de mesures des champs de vitesse utilisant la PIV ont été réalisées pour différents nombres de Rayleigh et comparées aux simulations. Ces travaux se poursuivront en collaboration avec POLIMI dans le cadre du nouveau projet européen ENDURANCE (2024-2028).

Parallèlement, dans le cadre du projet ISAC (2022-2026), soutenu par le plan France Relance, de nouveaux modèles multiphysiques de production, transport et séparation des produits de fission gazeux dans les réacteurs à sels fondus ont été développés.

et implémentés dans notre outil multiphysique NepFoam (thèse de M. Marone). Deux boucles en convection forcée – l'une fonctionnant à l'eau et l'autre avec des sels chlorures – ont été construites pour tester les modélisations et valider les modèles.

En outre, dans le cadre des activités liées à la

propulsion nucléaire électrique dans l'espace, le dispositif expérimental MARGUERITE a été conçu. Il permettra de valider les modélisations relatives aux technologies de caloducs (heat pipes) et de convertisseurs thermoélectriques. Ce dispositif sera également utilisé dans les travaux pratiques des formations de Phelma/Grenoble-INP.



(Crédit : Julien Giraud, LPSC, CNRS).

Boucle d'essai ISAC construite à FEST pour étudier l'implémentation d'un système d'injection de gaz inerte dans le circuit combustible d'un Réacteur à Sels Fondus (RSF). Cette boucle en convection forcée utilise un sel de type  $\text{LiCl-NaCl-BaCl}_2$ , dont le point de fusion est de 480 °C.

**POUR EN  
SAVOIR+**

#### Ressource Web

- [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=1327](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=1327)

# PLATEFORME DES PROCÉDÉS PLASMA AVANCÉS

## Personnel impliqué

Stéphane Béchu, Alexandre Bès (responsable technique), Laurent Bonny, Dominique Fombaron, Ana Lacoste (responsable scientifique).

La Plateforme Internationale des Procédés Plasma Avancés (IAP3) a pour vocation la formation par la recherche (thèses, post-doctorants) ou continue (formation continue annuelle ou Ateliers conjointement organisés avec les réseaux des Plasmas Froids et des Technologies du Vide). Elle assure l'interface, d'une part, entre les laboratoires pour la recherche interdisciplinaire et, d'autre part, entre le milieu académique et industriel pour la valorisation et le transfert technologique.



(Crédit : Équipe Plasmas, Matériaux & Nanostructures, LPSC, CNRS).

Électrode transparente conductrice en IWO (tungsten-doped indium oxide) sur cellules solaires à hétérojonction en silicium (SHJ-SC), plaquette format industriel M2 (156 × 156 mm), déposé par HPD (Hybrid Plasma Deposition : brevet CNRS-CEA FR3118280, collaboration CEA Liten/INES).

La plateforme IAP3, labellisée par l'Institut Carnot Énergies du Futur, comporte des techniques de caractérisation des plasmas, des équipements plasma micro-onde couvrant un domaine opératoire étendu en pression (de 0,1 mTorr à 100 Torrs) et en puissance (jusqu'à 5 kW, continu et/ou pulse), ainsi que des systèmes de contrôle de température lors des procédés (-100 à 800 °C). L'accès à ces installations est réglementé par la charte d'utilisation co-signée par le CNRS et l'UGA. Les études sont effectuées sous forme de prestations académiques ou industrielles.

Plus précisément, la plateforme IAP3 dispose de :

- deux réacteurs pour des dépôts par pulvérisation réactive assistée par plasma micro-onde (PEPVD, Plasma-Enhanced Physical Vapor Deposition) pour la synthèse de matériaux en films minces ;
- un réacteur de dépôt assisté par plasma (PECVD, Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) pour la synthèse de matériaux, de gravure et de traitement de surface dans un domaine de pression étendu (1 à 100 mTorr) ;
- de nombreuses techniques de caractérisation (électrique, optique, laser, électromagnétique) permettant le contrôle et la qualification des procédés mis en œuvre sur ces équipements.

En plus de son utilisation pour la formation continue et des ateliers organisés dans le cadre du réseau CNRS des plasmas froids, plusieurs études ont été menées sur les équipements de la plateforme pendant la période 2022-2024, comme par exemple :

- le dépôt de couches « épaisses » (1,7 et 3,4  $\mu\text{m}$ ) à base de bore ( $\text{B}_4\text{C}$  et B) sur tube en aluminium (collaboration avec la société FRAMATOME) ;
- le dépôt de  $\text{VO}_2$ , matériau thermochromique (transition Metal – Isolant), sur différents substrats:  $\text{SiO}_2$  / Saphir / Aluminium / Kapton, avec contrôle de l'épaisseur, du degré d'oxydation et de la cristallinité (collaboration INRS Varennes Canada) ;
- le dépôt d'Oxyde Transparent Conducteur sur cellule photovoltaïque associé au développement d'une technologie hybride innovante d'évaporation assistée par plasma micro-onde (collaboration CEA Liten/INES, brevet CNRS-CEA FR3118280) ;
- le traitement de nanofils de ZnO par plasma d'oxygène (collaboration LMGP, projet UGA-IRS 2020).

## POUR EN SAVOIR +

### Chiffres clés

Sur la période 2022 - 2024, accueil de 4 doctorants et 4 stagiaires (Master 2/ Master 1 et école d'ingénieurs).

### Ressource Web

- [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=275](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=275)

# LABORATOIRE DE MESURES DE BASSE ACTIVITÉ

## Personnel impliqué

Murielle Rousseau (Service Détecteurs et Instrumentation), Olivier Méplan, Mourad Ramdhane (Équipe Physique des Réacteurs).

Le Laboratoire de mesures de Basse Activité (LBA) fait partie du Réseau Becquerel, plateforme nationale d'analyse alternative de la radioactivité de l'IN2P3.

Le laboratoire possède 2 détecteurs germanium hyper pur (HPGe) bas bruit : les mesures de radioactivité sont donc des mesures par spectrométrie gamma. Les mesures faites au LBA sont dites de basse activité car elles ne concernent que des échantillons peu actifs (de l'ordre de la radioactivité naturelle). C'est pourquoi une attention particulière est apportée au dispositif afin de limiter les sources de bruit radiologique (rayonnement cosmique et radioactivité naturelle).

Le LBA est donc placé au sous-sol du LPSC (-5 m équivalent eau) afin de diminuer le bruit lié au rayonnement cosmique (suppression des protons et

électrons, atténuation des muons et neutrons). Les détecteurs sont entourés de plomb archéologique (cylindre de 2 cm d'épaisseur) entouré de 20 cm de plomb ultra pur ayant subi trois cycles de purifications par fusion suivie d'écémage. Ils sont placés à l'intérieur d'un cube formé par des détecteurs scintillateurs fonctionnant en véto, interdisant ainsi le comptage lors du passage d'un muon cosmique (voir figure).

Pour limiter l'accumulation du radon, l'air de la pièce est pompé directement sur le toit du bâtiment (h-9 m), filtré sur des filtres anti-poussières puis des filtres haute efficacité à charbon actif. L'air est alors injecté dans la salle de mesure.

Les échantillons mesurés au LBA sont principalement



(Crédit : Olivier Méplan, LPSC, CNRS).

À gauche : château de plomb entourant les détecteurs à l'intérieur du véto cosmique.

À droite : échantillon posé sur un détecteur HPGe (le cylindre de 2 cm de plomb archéologique au contact du détecteur est bien visible).



de trois types. Tout d'abord, certains proviennent de l'industrie nucléaire et tout particulièrement de la métallurgie du zirconium, des produits miniers au métal purifié, en passant par toutes les étapes de la chimie d'élaboration (zircon, tétrachlorure de zirconium, zircon déshafnié). La sélectivité chimique, spécifique de chaque étape du processus industriel, rend l'interprétation des spectres gamma particulièrement délicate, car elle détruit l'équilibre séculaire des chaînes radioactives naturelles.

Le second type d'échantillons s'inscrit dans la mesure de radioactivité naturelle. Nous effectuons des mesures de teneur en radioéléments dans les matériaux de construction pour le compte des industriels et des centres de recherche du bâtiment. Nous participons à la surveillance radiologique des nappes phréatiques aux environs immédiats des centres de stockage des déchets miniers, tests de lixiviation du radium sur ces mêmes déchets, avant stockage définitif.

Enfin, des mesures plus reliées à la recherche fondamentale sont effectuées, comme la caractérisation de matériaux bas bruit pour la réalisation de détecteurs (STEREO, MIMAC...), ou la mesure de flux lors d'irradiation (GENEPI, expériences FLUOLE...).

Une attention particulière a été mise sur les calculs de facteurs de coïncidences de sommes. En effet, pour un émetteur multi-gamma, il convient de corriger les comptages du fait que 2 gamma peuvent être détectés en « même temps ». Cela induit un déficit de comptage aux énergies des 2 gamma et un sur-comptage à l'énergie somme. Deux méthodes ont été développées et testées pour corriger de façon performante les comptages pour chacun des émetteurs multi-gamma mesurés. La première est basée sur une approche déterministe et la seconde sur une approche Monte-Carlo.

## POUR EN SAVOIR +

### Chiffres clés

Taux de comptage résiduels : 12 coups par minute (entre 20 à 3000 KeV).

Limites de détection pour l'Uranium et le Thorium : 0.01 Bq/kg (soit 1 à 2 parties par milliard)

Limites de détection pour la radioactivité artificielle : 0.007 Bq/kg ( $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{60}\text{Co}$ )

### Ressource Web

- A benchmark for Monte Carlo simulations in gamma-ray spectrometry Part II: True coincidence summing correction factors  
M.-C. Lépy, C. Thiam, M. Anagnostakis, C. Cosar, A. de Blas, H. Dikmen, M.A. Duch, R. Galea, M.L. Ganea, S. Hurtado, et al.  
<https://cea.hal.science/cea-04490360v1/document>

# SALLE DE COSMOLOGIE EXPÉRIMENTALE

## Personnel impliqué

Andrea Catalano, Juan Macias Perez (Équipe Cosmologie Observationnelle), Martino Calvo, Alessandro Monfardini (Institut Néel), Julien Bounmy, Olivier Bourrion, Olivier Choulet, Christophe Hoarau, Damien Tourres (Service Électronique), Mile Kusulja, Francis Vezzu (Service Études et Réalisations Mécaniques), Marc Marton (Service Détecteurs et Instrumentation), Jérôme Odier (Service Informatique).

Les laboratoires LPSC, Institut Néel, IPAG et IRAM jouent un rôle clé dans le développement des détecteurs cryogéniques KID (Kinetic Inductance Detectors) au sein du Groupement d'intérêt Scientifique KIDS. Ce groupe vise à renforcer la visibilité des activités et couvre la fabrication et la validation des KIDs, la cryogénie, l'instrumentation et l'étalonnage scientifique. Le groupe Cosmologie Observationnelle et les services techniques (électronique, mécanique, détecteurs et instrumentation, informatique) développent le système de lecture, le logiciel d'acquisition et l'optique.

En 2022, un nouveau laboratoire millimétrique, baptisée salle de cosmologie expérimentale, a été installée au LPSC. Fonctionnant en synergie avec l'Institut Néel, elle intègre un banc de test en laboratoire avec divers équipements de pointe (banc de tests électroniques, simulateur du ciel, système de modulation de polarisation, interférométrie, etc.).

Ce projet est financé par les Labex FOCUS et ENIGMASS, le CNES, l'IN2P3 et le LPSC. Il se concentre sur quatre axes principaux :

- le développement de la nouvelle génération de système de lecture et d'acquisition. L'accès à la chaîne complète de mesure permet un gain en efficacité pour les services techniques et une synergie accrue avec les chercheurs et chercheuses de l'équipe.
- les mesures de caractérisation des matrices de KIDs pour la future génération d'instruments pour le fond diffus cosmologique. Un cryostat supplémentaire par rapport à ceux à l'Institut Néel permet de diversifier la production

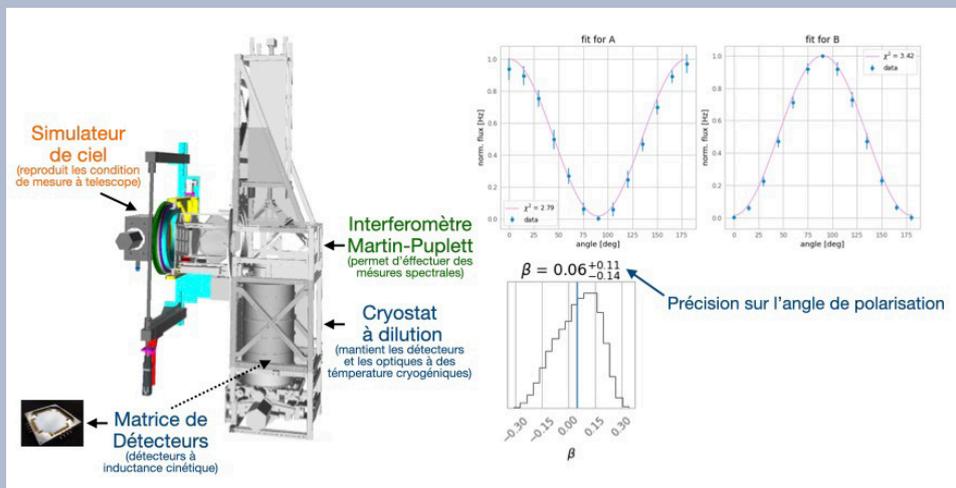
de matrices et de s'attaquer à plusieurs configurations de manière simultanée : pixels polarisés, basse et haute fréquences d'observations, spectroscopie en chip, etc.

- la R&D antireflet optique : mesures à froid sur les échantillons d'anti-reflet produits par l'atelier du LPSC. Comme pour le système de lecture et d'acquisition, la synergie ITA/chercheurs et le gain en temps sont très importants.
- la caractérisation spectrale et en polarisation. Nous avons entrepris le développement d'un banc de test permettant des mesures extrêmement précises de la réponse spectrale et en polarisation. Cela concerne les détecteurs KIDs, les éléments optiques comme les lentilles, les modulateurs (e.g. lame demi-onde) et analyseurs de polarisation (polarisateurs faits maison), et les sources de calibration.

Cette salle offre une plateforme complète pour la validation instrumentale et logicielle, le prototypage et la caractérisation des détecteurs. Elle jouera un rôle essentiel dans les expériences à venir comme Simons Observatory et LiteBIRD, en garantissant la précision des mesures et la maîtrise des effets systématiques.

Un exemple de réalisation effectué au cours de la dernière année est le projet PolarKID financé par le CNES. L'objectif du projet est de tester les détecteurs (LEKID : Lumped Element Kinetic Inductance Detector) en polarisation en vue d'une participation active dans la prochaine génération d'instrument pour l'observation du fond diffus cosmologique tel que l'expérience sol Simons Observatory et/ou le

satellite LiteBIRD. La plateforme a été utilisée pour faire des mesures de reconstruction de l'angle de polarisation avec une précision de quelques minutes d'arc.



(Crédit : A. Catalano, LPSC, CNRS).

À gauche : image du banc de test complet avec ses différents sous-systèmes.

À droite : résultats du projet PolarKID. Les points sur les deux figures en haut correspondent aux niveaux de polarisation moyen mesurés sur les cartes produites avec le simulateur de ciel. Les points sont confrontés au modèle théorique. L'histogramme en bas à droite correspond à la distribution des angles de polarisation pour les différents détecteurs de la matrice.

## POUR EN SAVOIR +

### Chiffres clés

- Température opérationnelle du cryostat : 100 mK
- Temps de refroidissement : 32 heures
- Nombre de pixel sur une matrice KID : 1000
- Vitesse d'échantillonnage : 4 kHz
- Flux de données typique en mesuré : 10 Mbyte/s

### Ressource Web

- Groupement d'intérêt scientifique KIDS : [https://ipag.osug.fr/~ponthien/GIS\\_Website/](https://ipag.osug.fr/~ponthien/GIS_Website/)





# ENSEIGNEMENT ET FORMATION PAR LA RECHERCHE

Le LPSC compte 29 enseignants-chercheurs rattachés à l'Université Grenoble Alpes, dont 20 à la faculté des sciences (UFR PhITEM), 9 à Grenoble INP (école Phelma) et 1 à l'IUT. Les membres du laboratoire, enseignants-chercheurs, chercheurs, doctorants sont très impliqués dans les formations et dans la vie universitaire. Durant la période COVID, le LPSC a également mis son amphithéâtre à disposition des formations du site.

Cette implication est importante dans de nombreuses filières : licence, master, école d'ingénieurs, IUT et recouvre l'ensemble des domaines présents dans le laboratoire, depuis la formation à la recherche en physique expérimentale et théorique à la recherche appliquée et aux formations professionnalisantes. Le laboratoire est aussi un site important d'enseignement sur le polygone scientifique avec de nombreux enseignements (au niveau master) sur le site et la présence au sein du laboratoire de la plateforme de travaux pratiques nucléaire qui est l'unique centre de formation expérimentale en physique nucléaire sur Grenoble et sa région.

L'intégration de ces formations au sein du LPSC permet de susciter la participation de l'ensemble du laboratoire et on peut en particulier noter la participation aux enseignements du personnel CNRS et le soutien technique du laboratoire à la plateforme de travaux pratiques.

Certains membres du laboratoire jouent un rôle très actif dans la vie des établissements universitaires en assurant diverses responsabilités au sein de leur composante, de l'université ainsi qu'au niveau national.

Le laboratoire accueille environ 60 stagiaires par an pour des périodes au moins supérieures à une semaine. Les étudiants viennent principalement des établissements universitaires de l'académie mais aussi d'autres établissements universitaires français ou étrangers et préparent un diplôme dont l'évaluation prend en compte le travail de stage.



# LES FORMATIONS MASTER ET INGÉNIEUR

Les enseignants chercheurs du LPSC interviennent significativement dans diverses formations en lien avec les thématiques de recherche du laboratoire, dont la coordination pédagogique est souvent assurée par l'un d'eux.

## Master, mention “Physique”

Le master de Physique de l'UGA, porté par l'UFR Phitem est une formation en deux ans débouchant principalement sur le doctorat, en physique fondamentale ou appliquée. Les enseignants du LPSC interviennent dans les deux années de la formation. La première année apporte une formation générale en physique avancée. Elle est divisée en deux parcours : Recherche Fondamentale (M1 RF) et Recherche & Innovation (M1 RI), amenant à une deuxième année de spécialisation.

En première année, les enseignants du LPSC sont particulièrement impliqués dans les UE en lien avec les thématiques de recherche de laboratoire (Physique nucléaire, Interactions rayonnement-matière, Mécanique quantique relativiste, Relativité Générale, Analyse des données).

La spécialisation de seconde année « Physique subatomique et cosmologie » (PSC) est en grande partie portée par le LPSC. La majorité des cours est dispensée dans les locaux du laboratoire. Le parcours PSC du master Physique entend dispenser une formation de haut niveau pour de futurs chercheurs, théoriciens ou expérimentateurs, avec de larges connaissances en physique fondamentale relevant de la 29ème section : physique des particules, théorie quantique des champs, cosmologie, astroparticules, tant sur le plan théorique qu'expérimental.

Le nombre d'étudiants dans ce parcours est de 10 à 15 par an. Ils proviennent principalement du M1 de physique de l'UGA, ainsi que de l'école d'ingénieurs Phelma, d'autres universités et écoles françaises et de formations étrangères. Les anciens étudiants de ce parcours ont obtenu ces dernières années d'excellents résultats aux concours du CNRS (chargés de recherche) et des universités (maîtres de conférences).

La spécialité de M2 « Physique Médicale et Radioprotection de l'Homme et de l'Environnement », dans laquelle des enseignants-chercheurs du laboratoire sont impliqués, forme les étudiants aux métiers de la radioprotection industrielle et médicale, de Personne Spécialisée en Radio-Physique Médicale ainsi qu'à la poursuite en doctorat. Ce parcours est habilité pour l'accès au concours d'entrée au Diplôme de Qualification en Physique Radiologique et Médicale (DQPRM). Elle bénéficie de la plateforme de travaux pratiques de physique subatomique du laboratoire, qui a notamment développé un atelier original de tomographie par émission de positrons.

Le laboratoire est aussi présent dans les spécialités de M2 « Energétique Nucléaire » et « Matériaux pour l'énergie », qui font partie de la mention physique mais sont portées par Grenoble INP.

## Master mention “Ingénierie nucléaire”

Le master Ingénierie Nucléaire de l'UGA est un master professionnel dédié au nucléaire industriel. L'objectif est de préparer les étudiants à une carrière d'ingénieurs dans l'industrie nucléaire dans les secteurs de la sûreté nucléaire, de la gestion des déchets radioactifs et du démantèlement. Il se déroule sur deux ans et comporte trois parcours liés à l'aval du cycle et à la sûreté nucléaire : « Gestion Scientifique et Technologique des Déchets Radioactifs » (GeDeRa), « Assainissement, Démantèlement des Installations Nucléaires » (ADIN) » et « Sûreté Nucléaire » (SN). Les deux premiers parcours sont co-habilités par

l'Institut national des sciences et techniques nucléaires - Commissariat à l'énergie atomique (INSTN – CEA).

La formation proposée en première année comporte un volet important de physique nucléaire, de chimie et de génie mécanique. La caractéristique principale du master est une très forte liaison avec le milieu industriel, se traduisant par 4 à 6 mois de stage en industrie en M1, une formation en alternance en M2 (18 semaines en formation et 34 en entreprise) depuis la rentrée 2008, une forte proportion d'intervenants industriels dans la formation et différentes conventions de partenariat. L'effectif total pour ces trois parcours est de 50 étudiants par an. Le master 1, ouvert en 2008, a un effectif d'environ 30 étudiants. L'insertion professionnelle des diplômés est excellente : la durée d'attente moyenne avant l'obtention d'un CDI dans le monde industriel est actuellement inférieure à 2 semaines.

## Master mention “Électronique, génie électrique, Automatique”, parcours “Microélectronique, Intégration Systèmes Temps Réels Embarqués” (EEA-MISTRE)

Les objectifs de ce parcours en deux ans sont de former les étudiants à la conception de systèmes numériques intégrés complexes et systèmes sur puce, aussi bien sur les aspects matériels que logiciels embarqués dans ces systèmes. Les étudiants en formation initiale se destinent à une carrière en milieu industriel ou à une carrière dans la recherche, avec une poursuite en thèse

après les masters, alors que les étudiants en alternance se destinent quasi exclusivement à une carrière en milieu industriel. Des étudiants en microélectronique, issus du master EEA-MISTRE, sont régulièrement accueillis en tant que stagiaires au laboratoire. Des doctorants de cette spécialité effectuent également leur thèse au laboratoire.

## Les cursus ingénieurs Phelma et ENSE3

L'école Phelma de Grenoble INP propose, parmi dix filières de formation initiale, une filière « **Génie Energétique et Nucléaire** » (GEN) qui forme 45 à 50 ingénieurs par an, spécialisés majoritairement dans la physique du cœur du réacteur. La formation proposée sur trois ans comporte un volet important de physique nucléaire, neutronique, mécanique des fluides et thermo-hydraulique.

La filière « **Biomedical Engineering** » (Biomed) forme des ingénieurs dans différents domaines de l'instrumentation biomédicale avec des compétences interdisciplinaires (sciences de l'ingénieur et biologie) théoriques et pratiques.

Les enseignants du LPSC sont à la fois impliqués dans de nombreux cours spécialisés de la tagerie médicale et nanomédecine, et l'option Nanobiologie

et dispositifs médicaux. hématique de ces deux filières, mais également dans leur gestion (responsables de filière, d'UE, des Relations Entreprises et des Relations Internationales).

En complément de ces deux filières, l'école Phelma gère les M2 « **Energétique nucléaire** » et « **Matériaux pour l'énergie** » qui offrent également un parcours de formation aux énergies renouvelables et comptent entre 10 et 20 étudiants.

Les enseignants du LPSC sont également impliqués dans diverses formations internationales de Phelma : le master international « **Materials science for Nuclear Energy** » (MaNuEN), et le « Bachelor in Nuclear Engineering » (BNE) au niveau licence (5 à 20 étudiants par an depuis 2008).

De son côté, l'école ENSE3 de Grenoble INP forme chaque année une trentaine d'élèves-ingénieurs dans le domaine du nucléaire au sein de la filière « **Ingénierie de l'Energie Nucléaire** » (IEN), avec une formation orientée sur la production de l'énergie nucléaire, l'exploitation et la sécurisation des installations.



Figure 1 (Crédit : Benoît Clément, LPSC, CNRS).

Open space de la plateforme de travaux pratiques.

# AUTRES FORMATIONS

## L'école ESIPAP

L'école ESIPAP (École européenne d'instrumentation en physique des particules et des astroparticules)

Dans le cadre du LabEx ENIGMASS, une école de physique pour l'instrumentation ESIPAP a été créée en 2014. Cette école reprend le modèle d'organisation de l'école de physique et de technologie des accélérateurs de particules JUAS. ESIPAP est basée

au Technoparc d'Archamps en Haute-Savoie et elle est organisée par l'institut ESI. L'école forme des étudiants au niveau master et doctoral dans le monde entier mais aussi des professionnels cherchant une formation continue dans l'instrumentation. ESIPAP est organisée autour de deux modules d'un mois chacun, ces modules peuvent être préparés la même année ou séparément. ESIPAP peut être intégrée dans des programmes de formation universitaires européens qui délivrent des crédits ECTS. C'est le cas du master 2 PSC, du master 2 énergétique nucléaire et de la filière ingénierie GEN.

## Formation continue aux traitements de surfaces par plasma

Depuis 1986, un stage annuel de formation continue en plasma est organisé conjointement par le LPSC et Grenoble INP. Il permet aux ingénieurs, doctorants,

cadres et techniciens supérieurs d'acquérir des notions de base sur la production et la physique des plasmas froids et leurs applications industrielles. Une partie de ce stage de 5 jours est accueillie au LPSC (13 heures de formations pratiques). Les intervenants sont des enseignants-chercheurs, chercheurs et ingénieurs du LPSC, ainsi que des industriels, professeurs ou ingénieurs extérieurs spécialistes des matières dispensées. La forte demande de formation venant de l'industrie s'est concrétisée par l'organisation, en plus de la formation récurrente, de formations spécifiques « à la carte » pour des laboratoires et des entreprises.

## Focus sur l'accueil de stagiaires au LPSC

L'accueil de stagiaire est essentiel pour le laboratoire, car c'est une contribution très importante à notre mission d'enseignement en permettant aux étudiants de découvrir et participer aux différentes activités du laboratoire et de construire leur projet professionnel. L'accueil de stagiaires permet aussi de renforcer l'attractivité du laboratoire pour leur donner envie de

nous rejoindre dans la suite de leur parcours, en thèse, en post-doc, mais aussi en CDD ou sur des positions permanentes sur des postes IT.

Le LPSC accueille chaque année une soixantaine de stagiaires universitaires du niveau Bac+1 au niveau M2 (figure 1, à gauche) pour des durées de stage allant de 1 à 6 mois. La plupart des stages a lieu pendant le second semestre universitaire avec un pic vers entre les mois de mai et de juin où plus de 40 étudiants sont présents au laboratoire. Les étudiants sont accueillis dans les équipes de recherche du laboratoire mais aussi dans les services (SDI, SERM, Service informatique, Service électronique) pour des stages dans le cadre

des formations BTS, BUT et ingénieurs. Les étudiants viennent principalement des formations du site où les enseignants-chercheurs du laboratoire interviennent

mais nous accueillons aussi de nombreux étudiants venant d'autres établissements universitaires français ou étrangers (figure 2, à droite)

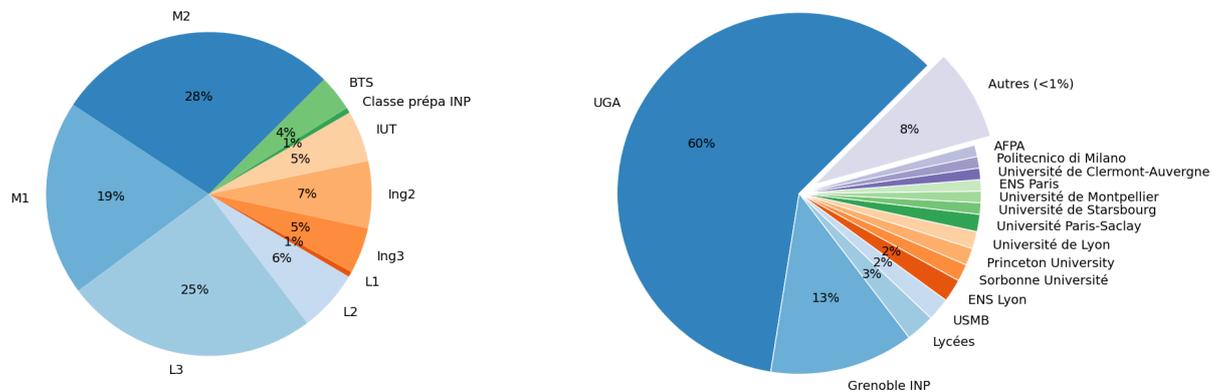


Figure 2 (Crédit : LPSC, CNRS).

Répartition des stagiaires par niveau et par établissement.

## Focus sur une installation pédagogique : la plateforme de Travaux Pratiques

La plateforme de physique nucléaire est le centre unique de formation en physique expérimentale nucléaire sur pôle grenoblois, elle a donc un rôle central dans l'ensemble des formations décrites (master de physique, master ingénierie nucléaire, formation ingénieurs). Elle est le résultat de la mutualisation des travaux pratiques de Phitem et de Phelma au sein d'une plateforme commune d'enseignement basée dans les locaux du LPSC.

Le cœur de la plateforme est un grand open-space (figure 1) qui accueille une quinzaine de postes de travail couvrant de multiples types de rayonnements (alpha, bêta, gamma, neutrons, cosmiques) et technologies de détection (scintillateurs, semi-conducteurs, détecteurs Cherekov, détecteurs d'ionisation) permettant l'acquisition de connaissances en physique fondamentale (physique nucléaire et physique des particules), en physique appliquée (médecine, énergie, radioprotection) et en physique instrumentale (détecteurs de rayonnement, systèmes d'acquisition et analyse de données). Au sein de la plateforme on dispose aussi de deux salles informatiques (20 postes), dont une consacrée à la simulation du pilotage de réacteurs nucléaires utilisant le logiciel SIREP (développé par la société CORYS).

La plateforme de TP peut s'appuyer sur les moyens techniques du LPSC pour la maintenance des installations et les développements comme des développements d'électronique d'acquisition ou la réalisation de pièces mécanique.

### POUR EN SAVOIR +

#### Chiffres clés

29 enseignants-chercheurs impliqués dans 3 grandes composantes de l'UGA  
 ~ 400 étudiants par an sur la plateforme de TP.  
 ~ 1000 h d'enseignement dispensées au LPSC, principalement sur la plateforme de TP.

#### Ressources Web

Master de Physique : <https://formations.univ-grenoble-alpes.fr/fr/catalogue-2021/master-XB/master-physique-IAQK7WZY.html>  
 Master Ingénierie nucléaire : <http://lpsc.in2p3.fr/MasterITDD>  
 Ecole Phelma : <https://phelma.grenoble-inp.fr>  
 Ecole ESIPAP : <http://www.esi-archamps.eu/>

# LE LABORATOIRE DANS LA SOCIÉTÉ



Le laboratoire s'inscrit résolument dans une démarche d'ouverture à la société, affirmant son rôle essentiel dans la diffusion du savoir et la sensibilisation du public aux enjeux de la recherche. À travers des actions de communication variées, l'accueil d'élèves en stages d'observation, il s'engage pour faire découvrir les métiers de la recherche et à partager ses connaissances avec tous les publics, en particulier les scolaires. Ces actions visent à éveiller les curiosités, à inspirer les futures générations et à renforcer les liens entre science et société.

Parallèlement, le laboratoire assume sa responsabilité sociétale et environnementale. Conscient de l'impact de ses activités, il s'attache à mesurer cet impact, à sensibiliser l'ensemble de ses membres aux enjeux environnementaux et à mettre en œuvre des actions concrètes pour réduire son empreinte écologique. Cet engagement reflète la volonté du laboratoire de contribuer positivement à la société, en alignant ses pratiques avec les principes du développement durable et en favorisant une recherche responsable et inclusive.



# COMMUNICATION

Les activités de communication du laboratoire incluent la contribution à la mise en œuvre ou à l'organisation d'actions variées (événements, création et mise à jour de contenus et de matériels, etc...), initiées par les personnels du laboratoire, ou portées par des dynamiques collaboratives et/ou institutionnelles. Ces actions s'adressent aux personnels du laboratoire, à la communauté institutionnelle et scientifique ainsi qu'au grand public et au monde éducatif. Diffuser la connaissance vers la société, relayer et soutenir la communication institutionnelle, et améliorer le fonctionnement du laboratoire sont les objectifs de ces activités. Elles sont co-pilotées par les correspondants communications du laboratoire et un Comité Technique Communication interne, composé de membres de la direction et de personnels scientifiques et techniques représentant les différentes thématiques de recherche et services du LPSC.

## **Chargés de communication**

Audrey Colas, Florent Collovati, Jean-Stéphane Ricol.

## Congrès, conférences scientifiques et séminaires

Le laboratoire organise ou participe régulièrement à l'organisation de workshops, conférences, formations et réunions de collaborations, destinés à la communauté scientifique. Ainsi, le LPSC a co-organisé ou accueilli près de 20 événements de ce type sur la période 2022-2024.

Parallèlement, de nombreux séminaires scientifiques ont lieu chaque année, animés par des intervenants extérieurs mais également les docteurs du LPSC.

## Grand public et monde éducatif

### Fête de la science

Le LPSC participe chaque année à la Fête de la Science, en intégrant le programme piloté par le service communication de la délégation Alpes du CNRS, ou en figurant au programme des Centres de Culture Scientifique Technique et Industrielle de Chambéry et de Grenoble (La Galerie Eurêka et La Casemate). D'autres actions menées individuellement par des personnels du laboratoire, sont également entreprises, telles que des interventions en Maisons des Jeunes et de la Culture du département isérois.



(Crédit : Jean-Stéphane Ricol, LPSC, CNRS).

Visite de classes de lycée.

### Interventions des personnels (scolaires, grand public, médias)

Un nombre conséquent de conférences et d'interventions sont réalisées par des personnels du laboratoire : cafés des sciences, rencontres et débats, expositions, interventions dans les médias (presse, émissions de radio, articles de vulgarisation, blogs et vidéos), ou

encore cours spécifiques. Les « Leçons expérimentales sur l'antimatière » rencontrent un franc succès et touchent entre 700 et 1000 lycéens chaque année.

Le LPSC accueille très régulièrement des classes de lycéens et d'étudiants d'établissements français et étrangers, sur ses sites de Grenoble et de Modane. Une équipe de guides et d'intervenants techniques et scientifiques est mobilisée pour leur accueil. Les élèves et leurs accompagnants bénéficient d'une présentation du laboratoire et de ses activités, ainsi que de visites commentées d'installations techniques et d'expériences.

### International Masterclasses hands on particle physics

Depuis 2010 le LPSC accueille chaque année des classes de lycées durant une journée, dans le cadre du programme des Masterclasses internationales organisé par le CERN. Les élèves suivent des cours d'initiation à la physique des particules ainsi qu'une présentation de différents métiers de la recherche. L'après-midi, ils travaillent avec des données du détecteur ATLAS qui incluent de vrais candidats Higgs (la particule découverte au CERN en 2012) et partagent ensuite le produit de leurs mesures par visioconférence en anglais animée depuis le CERN avec les étudiants d'autres pays participants, comme les physiciens le font au sein de leur collaboration internationale.

### Stages d'observation

Le laboratoire accueille des élèves collégiens de troisième et lycéens de seconde pour des stages d'observation individuels ou collectifs de 5 jours. La mise en place de ces accueils et une animation dédiée, peuvent mobiliser jusqu'à 15 agents du laboratoire, personnels administratifs, techniques et scientifiques. Chaque année, ce sont 40 à 50 élèves accueillis sur les sites de Grenoble et de Modane.

## Conférences pour les agents du LPSC

Rendez-vous mensuel à succès, le «café du laboratoire» est un événement matinal mêlant convivialité, science et diffusion d'informations en lien avec la vie du laboratoire. Deux autres rendez-vous, tenus en juin et décembre sous la forme d'assemblées générales, ponctuent l'année et sont l'occasion de réunir l'ensemble

des personnels tous services et équipes de recherche confondus. Ils permettent de faire des points scientifiques, techniques, administratifs et stratégiques sur les activités du laboratoire, mais accueillent également de très intéressantes interventions extérieures telles que la conférence donnée par Marina Aletheia en décembre 2024 intitulée «Les mystères de l'effet Placebo».

## Faits marquant 2022-2024

### Demain mais en mieux

Les 3 et 4 février 2023, le festival Yggdrasil (Lyon) a attiré plus de 10 000 visiteurs dans une ambiance alliant fantastique, créativité et innovation.

Un espace dédié aux sciences, « Demain mais en mieux », a permis aux visiteurs de découvrir le monde de la recherche. L'IN2P3 a proposé une expérience immersive autour des mystères de l'univers, avec des animations phares telles que l'exploration du

plus petit zoo du monde, la cabine cosmique et la rencontre avec le neutrino, cette particule capable de traverser la matière.

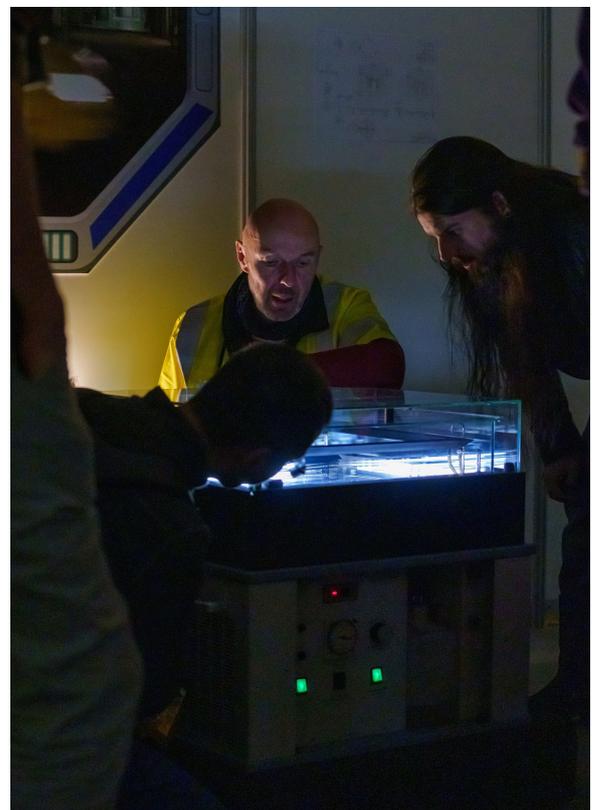
Des chercheurs et ingénieurs du LPSC ont partagé leur passion et leur savoir avec le public, incarnant l'engagement du CNRS et de l'IN2P3 à promouvoir la science auprès du grand public. Le succès de cet événement, marqué par l'enthousiasme des visiteurs, montre l'importance de telles initiatives pour rapprocher la science du quotidien et éveiller la curiosité des jeunes générations.

L'IN2P3, le CNRS et le LPSC ont ainsi démontré que la science peut être une source d'émerveillement et d'imagination, à l'image de l'univers qu'elle cherche à comprendre.



(Crédit : CNRS).

Flyer de l'évènement «Demain, mais en mieux !»



(Crédit : Florent Collovati, LPSC).

Stand du LPSC.

## Année de la physique

Dans le cadre de l'Année de la Physique 2024, le LPSC a accueilli une trentaine de professeurs du secondaire pour une journée de découvertes scientifiques, visant à rapprocher les acteurs de l'éducation des avancées scientifiques actuelles et à nourrir l'enthousiasme des enseignants pour les sciences fondamentales.

Les participants ont exploré les installations scientifiques du LPSC, telles que l'installation FEST et le pôle accélérateurs et sources d'ions. Guidés par des chercheurs et ingénieurs passionnés, les enseignants ont découvert les plateformes de recherche et de formation, en particulier la plateforme d'instrumentation nucléaire, et l'expérience MIMAC. Chaque étape de la visite leur a permis de mieux comprendre le fonctionnement des infrastructures scientifiques et leur impact sur la compréhension de l'univers.

Trois séminaires ont été organisés pour offrir un aperçu pédagogique des travaux du LPSC :

1. « Dans les trous noirs et avant le big bang » avec Aurélien Barrau
2. « Cosmologie observationnelle » avec Céline Combet
3. « Jusqu'où nous mènera la radioactivité ? » avec Yannick Arnoud

Ces conférences ont permis aux enseignants de repartir avec des connaissances concrètes à partager avec leurs élèves.

L'évènement a permis aux professeurs d'approfondir leurs connaissances en physique moderne, de découvrir des exemples concrets pour leurs cours et d'échanger avec des chercheurs. Il illustre l'importance de rapprocher le monde académique de l'enseignement secondaire pour promouvoir une culture scientifique inspirante.



(Crédit : Florent Collovati, LPSC).

Intervention d'un conférencier dans le cadre de l'année de la Physique 2024 au LPSC.

## Particule et révélations, Escape Game grand public du LPSC

*« Collègues de Cécile Quarks, chercheuse en cosmologie et physique des particules au LPSC, vous êtes inquiets car elle a subitement disparu depuis quelques jours ! Vous pensez que cela peut avoir un rapport avec ses recherches. Vous décidez donc de partir des éléments de travail qu'elle a laissés derrière elle pour retrouver sa trace... ».*

C'est avec ces mots que le LPSC accueille les joueurs de son escape game grand public, intitulé « Particule et Révélations » et né en mai 2021. Fruit d'une collaboration de plus de 8 mois entre les membres du

Comité Technique Communication du LPSC, et une société grenobloise créatrice de jeux, l'escape game « Particule et Révélations » se déroule selon 6 étapes, dont le fil conducteur est la démarche scientifique. Sa mise en œuvre nécessite la présence de maîtres du jeu (Game Masters) qui apportent une aide à la résolution des énigmes, assurent un apport pédagogique d'informations scientifiques en lien avec les sujets abordés, et enfin interprètent un rôle dans l'intrigue (roleplay). « Particule et Révélations » est destiné à être joué lors d'évènements à destination du grand public, et de publics scolaires. Chaque année pour la fête de la science le LPSC accueille entre 3 et 5 classes d'élèves du secondaire.

## Première participation du LPSC au « Phelma Job Fair »

Chaque année, le Phelma Job Fair rassemble étudiants, industriels et laboratoires pour favoriser les opportunités professionnelles et le partage des connaissances. Organisé par Grenoble INP – Phelma, UGA, cet événement attire une multitude de participants – des entreprises en quête de jeunes talents aux étudiants aspirant à intégrer le monde professionnel. Cette journée, essentielle dans le calendrier de l'école, permet de créer des passerelles solides entre le monde universitaire et l'industrie.

La présence du LPSC au Phelma Job Fair offre de nombreux bénéfices pour les étudiants, l'école et le laboratoire :

- Rencontrer des talents prometteurs : l'évènement permet au LPSC d'entrer en contact direct avec des étudiants passionnés par la physique et les technologies. Ces échanges sont l'occasion pour le laboratoire de présenter ses projets, ses innovations et ses axes de recherche actuels.
- Attirer de futurs stagiaires et collaborateurs : grâce à des sessions de présentation et à des entretiens individuels, le LPSC peut recueillir des CV de candidats intéressés par des stages ou des collaborations dans nos domaines de la recherche, créant ainsi une réserve de talents qualifiés.
- Sensibiliser aux enjeux de la physique

fondamentale : par sa participation, le LPSC a l'opportunité de sensibiliser les étudiants aux questions scientifiques actuelles, de les informer sur les défis du domaine, et de transmettre sa passion pour la recherche.

La présence du LPSC au Phelma Job Fair témoigne d'une volonté de renforcer les liens entre le monde de recherche et le monde industriel, tout en offrant une vision concrète des perspectives professionnelles dans nos thématiques.



(Crédit : Florent Collovati, LPSC).

Stand du LPSC lors du Phelma Job Fair 2024.

## POUR EN SAVOIR+

### Ressources Web

- Site web LPSC : <https://lpsc.in2p3.fr>
- Page web LPSC "Séminaires" : <https://lpsc-indico.in2p3.fr/category/71/>
- Planétarium de Vaulx-en-Velin : <https://www.planetariumvv.com/>
- Site web "La Science Taille XXElles" : <https://xxlgrenoble.sciencesconf.org/>
- Page web "Master classes" : [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=1856](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=1856)
- Compte LinkedIn LPSC : <https://www.linkedin.com/company/laboratoire-de-physique-subatomique-et-de-cosmologie/>
- Vidéo "Enigmass, ou l'énigme de la masse" (compte YouTube ENIGMASS) : [https://www.youtube.com/channel/UCQGg\\_ds8MPa4BN0\\_M7yAaqw](https://www.youtube.com/channel/UCQGg_ds8MPa4BN0_M7yAaqw)
- Site web 50 ans IN2P3 : <https://50ans.in2p3.fr/>
- Page web LPSC "Particule et révélations" : [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=370](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=370)

# RESPONSABILITÉ SOCIÉTALE ET ENVIRONNEMENTALE

Conscient de l'évolution de la société et des défis environnementaux toujours plus présents, le laboratoire souhaite jouer pleinement son rôle sociétal. Différentes mesures applicables rapidement ont été mises en place entre 2022 et 2024, à la fois dans le domaine des émissions de gaz à effet de serre et dans celui de la préservation de la biodiversité. En parallèle, un groupe de travail s'investit dans une réflexion à plus long terme sur la réduction de l'empreinte environnementale des activités de recherche. Les thématiques liées à l'égalité et la diversité, soutenues depuis plusieurs années déjà par plusieurs membres du laboratoire, ont été structurées via la création d'une cellule dédiée.

## Développement Durable

Yannick Arnoud, Aurélien Barrau, Annick Billebaud, Johan Bregeon, Pierre Delebecque, Cyrille Doux, Nicolas Emeriaud, Ludovic Eraud, Valérie Favre, Fabienne Ledroit (référente), Frédéric Melot, Laurence Perotto, Olivier Rossetto, Yoann Sallaz-Damaz, Anne Stutz, Thomas Thuillier, Cécile Vannier.

## Biodiversité

François Montanet, Stéphanie Roccia, Samuel Roni, Christophe Vescovi.

## Égalité et Diversité

Adrien Bidaud, Fairouz Malek, Christine Servoz-Gavin.

## Missions et organisation

L'implication du laboratoire pour assurer ses responsabilités sociétales et environnementales est organisée via trois cellules : Développement Durable, Biodiversité, Égalité et Diversité.

Le LPSC a installé l'éco-responsabilité au cœur de ses priorités en 2022 en confiant le rôle de «référent-e Développement Durable (DD)», ou «référent-e Responsabilité Sociale et Environnementale (RSE)» à l'adjointe à la direction du laboratoire. La mission de cette personne est de piloter la démarche DD/RSE du laboratoire en organisant les échanges de point de vue et l'émergence d'idées permettant d'aboutir à une proposition de plan d'action qui soit en adéquation tant au niveau local que national. La référente RSE coordonne la cellule Développement Durable, composée

aujourd'hui de 18 membres représentatifs de la plupart des équipes et services. Les missions de la cellule DD sont d'établir et d'étudier l'empreinte environnementale du laboratoire, notamment ses émissions de gaz à effet de serre (GES), et de sensibiliser l'ensemble des agents aux pratiques visant à limiter leur empreinte sur l'environnement dans le cadre professionnel.

La cellule Biodiversité a été créée début 2023 et est forte aujourd'hui d'une dizaine de membres. Ses missions sont le référencement et la préservation de la biodiversité dans le périmètre du laboratoire, et la sensibilisation du personnel, invité à ouvrir les yeux sur la richesse de notre environnement proche à préserver.

La cellule Égalité et Diversité a été créée fin 2024 et est composée de trois membres, dont la responsable des ressources humaines du laboratoire. Cette cellule est à l'écoute des personnels concernés ou témoins de situations de harcèlement, de discrimination, de sexisme ou tout autre fait de risques psychosociaux. La cellule a aussi le rôle de promotion de la diversité et de l'égalité des genres, et d'information sur les droits et les actions qui peuvent être menées.

## Focus et sélection de faits marquants durant la période 2022-2024

### Effet de serre

La première action de la cellule DD a été de faire le bilan des émissions de GES (BGES) du laboratoire pour les années 2019 (année de référence pré-covid) à 2021. Douze postes d'émission ont été considérés à l'aide de l'outil « GES 1point5 » du groupement de recherche « Labo1point5 ». Le bilan a ensuite été mis à jour chaque année pour l'année écoulée. On peut voir l'évolution du BGES des activités du laboratoire sur la figure 1.

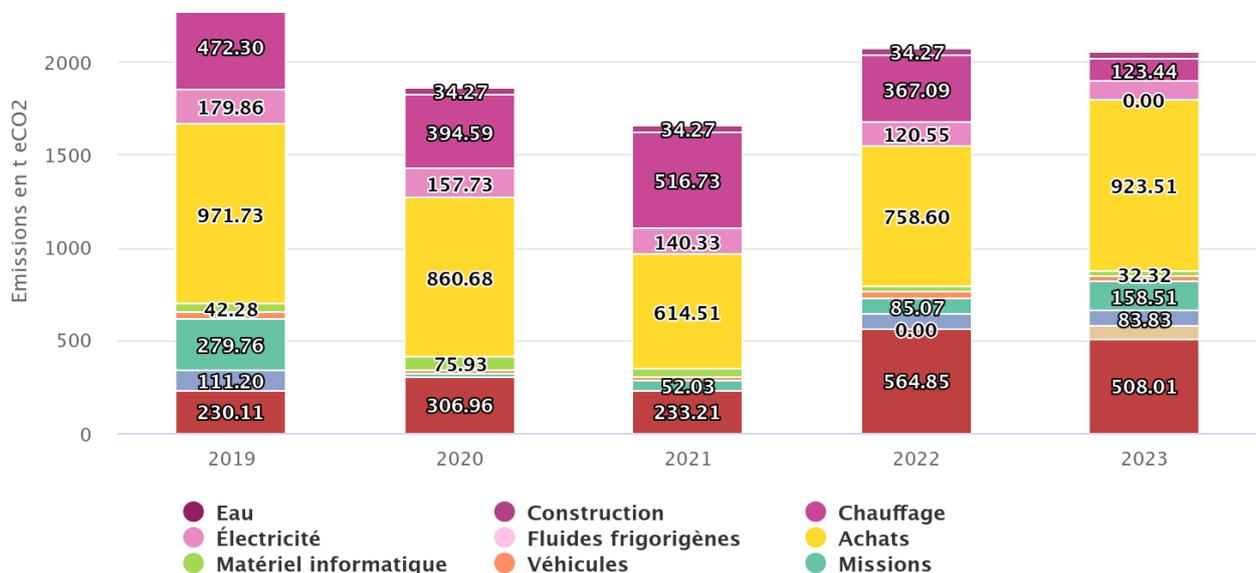


Figure 1

Évolution du bilan des émissions de gaz à effet de serre (en tonnes équivalent CO<sup>2</sup>) de 2019 à 2023.

Les postes qui dominent sont ceux des achats, du chauffage et des «activités de recherche». Dans le cas du LPSC, ces dernières correspondent aux expériences du CERN (ALICE et ATLAS), les télescopes astronomiques et le calcul intensif, dont les BGES sont évalués par ailleurs. Les achats fluctuent beaucoup d'année en année au gré de la construction des expériences. Le chauffage fluctue suivant la météo, mais une tendance à la réduction des émissions est observée depuis 2022 sous l'effet conjugué de deux facteurs : le passage au chauffage urbain en 2022 et l'installation progressive de robinets thermostatiques sur tous les radiateurs à partir de 2023. En 2022 et 2023, les expériences du CERN représentent environ 90 % du poste «activités de recherches», ce qui explique l'augmentation brutale de leur bilan en 2022, au moment du redémarrage du collisionneur pour le Run 3.

Les postes d'émission secondaires sont l'électricité, les déplacements domicile-travail, les missions et le matériel informatique. Les émissions dues à l'électricité diminuent, en partie grâce au passage systématique aux ampoules LED lors des rénovations menées dans nos bâtiments. La rénovation de l'éclairage de l'atelier mécanique a permis de réduire la consommation électrique de 20 à 2 kW. Les déplacements

domicile-travail n'ont pas été évalués en 2020 et 2021. Ils ont diminué en 2022 par rapport à 2019, et encore légèrement en 2023, en grande partie grâce à la mise en place du télétravail. On voit nettement l'effet du confinement de la période « covid » sur les émissions dues aux missions, qui avaient chuté en 2020 et 2021, et remontent lentement depuis. Le bilan du matériel informatique a commencé à décroître grâce à de nouvelles modalités d'achat et de renouvellement. En particulier, la durée d'utilisation des ordinateurs est progressivement allongée de cinq à sept ans.

### Biodiversité

À l'occasion du renouvellement du contrat d'entretien des espaces verts, le cahier des clauses techniques particulières a été modifié pour inclure notamment le fauchage différencié des pelouses et prairies. Par ailleurs, une pré-compilation des données naturalistes du site, effectuée par deux stagiaires d'un laboratoire d'écologie voisin (le LECA), a fait ressortir la nécessité d'enrichir la strate arbustive. Une haie vive multi-étagée de 30 m de long a donc été plantée début 2024 (voir figure 2). Deux haies sèches de 20 m chacune ont également été mises en place. Fin 2024, les premiers contacts ont été pris avec la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO) en vue de la création d'un refuge LPO sur le site du laboratoire.



Figure 2

Haie vive nouvellement plantée au nord de la grande prairie du LPSC.

**POUR EN  
SAVOIR+**

#### Ressources Web

- Page DD/RSE de l'extranet : [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=1411](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=1411)
- Labos 1point5 : <https://labos1point5.org/>





# SOUTIEN AUX ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Les services techniques jouent un rôle essentiel dans la conception, la recherche et développement (R&D), la construction, la mise en œuvre et la maintenance de détecteurs ou de systèmes complexes pour les projets scientifiques menés par les équipes du laboratoire. Ces services comprennent le Service Électronique, le Service Informatique, le Service d'Étude et de Réalisation Mécanique, le Service Détecteurs & Instrumentation, ainsi que le Service d'Ultra Basse Radioactivité, qui gère les activités techniques de la plateforme nationale en milieu souterrain à Modane.

Au sein de des services, les équipes sont mobilisées sur plusieurs projets, avec un niveau d'engagement déterminé par les priorités scientifiques du laboratoire, en coordination avec le responsable du service qui définit la charge de travail.

Les services techniques représentent un atout stratégique pour le laboratoire, lui permettant de jouer un rôle clé dans la définition et la réalisation des projets. Ils disposent également d'expertises de pointe, qui leur offre la capacité de prendre des responsabilités majeures et visibles, tant au niveau national qu'international, renforçant ainsi leur rôle central dans de nombreux projets scientifiques.

En complément des services techniques, les services supports sont essentiels pour accompagner le montage et la gestion des projets, ainsi que pour assurer le suivi financier et des ressources humaines au sein du laboratoire. Ces services incluent le Service Administratif & Financier, le Service Communication & Documentation, le Service Patrimoine et Infrastructures, et le Service Sécurité et Radioprotection.

Le Service Administratif et Financier occupe une place centrale dans la gestion des relations avec l'institut, la Délégation du CNRS et les tutelles universitaires. Il apporte également un soutien quotidien au personnel, que ce soit pour l'accueil, la gestion de carrière ou le montage et le suivi administratif des projets scientifiques.

Le laboratoire s'appuie sur les actions ciblées et régulières du service Documentation, qui assure le suivi des productions scientifiques des chercheurs. Ce travail contribue à renforcer la visibilité du laboratoire auprès de ses tutelles et des instances d'évaluation, telles que le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (HCERES).

Par ailleurs, le Service Sécurité et Radioprotection et le Service Patrimoine et Infrastructures jouent un rôle clé dans la mise en place d'infrastructures adaptées aux projets, tout en garantissant des conditions de sécurité optimales. Leur action s'étend à l'ensemble des bâtiments du laboratoire, y compris les halls d'expérimentation et les ateliers de fabrication et de montage. Deux assistants de prévention (un pour le site de Grenoble et un pour celui de Modane) veillent à la surveillance et à l'application des consignes de sécurité sur chaque site.

L'expertise et l'engagement de ces services supports jouent un rôle clé dans le bon déroulement et le succès des activités du laboratoire.

# SERVICE ADMINISTRATIF ET FINANCIER

## Membres permanents

Loubna Benabderrahmane, Louis Coppola, Isabelle Dos-Santos, Valérie Favre, Hélène Latimier, Agnès Lucas, Cécile Martin, Johana Paquien, Françoise Petiot, Alain Retailleau (chef de service), Françoise Révillon (jusqu'au 31 décembre 2023), Christine Servoz-Gavin (cheffe de service adjointe), Cécile Vannier.

## Membre non permanent

Kian Destève (CDD).

Le Service Administratif et Financier (SAF) assure la gestion administrative des personnels, la gestion financière et budgétaire du laboratoire ; il apporte ses services d'accompagnement aux recrutements ainsi qu'à l'élaboration et le suivi des contrats de recherche et des contrats industriels. Le service assure le relai institutionnel avec l'IN2P3 ainsi que les services des tutelles du laboratoire : la délégation régionale du CNRS, l'Université Grenoble Alpes et Grenoble INP. Garant de la réglementation administrative, le service apporte assistance et conseil aux responsables d'équipes, aux chefs de services, ainsi qu'aux personnels du laboratoire.

## Missions et organisation

Le service administratif et financier du LPSC apporte son soutien aux activités de recherche et assure en continu un rôle d'interface avec l'IN2P3 et les trois

établissements de tutelle de l'unité. Il apporte assistance et conseil aux responsables d'équipes et de services, ainsi qu'aux personnels de l'unité, que ce soit en matière de ressources humaines, ou en matière budgétaire, financière et contractuelle.

Pour mener à bien ses missions, le service est organisé en trois secteurs d'activité : le pôle Ressources Humaines, le pôle Ressources Financières, le pôle Logistique.

## Le pôle ressources humaines

Le pôle Ressources Humaines a pour mission de conseiller et informer les personnels sur leurs droits et leurs obligations. Il assure une veille réglementaire

auprès des trois tutelles afin d'apporter réponses aux 220 agents du laboratoire, permanents et contractuels, qu'ils soient chercheurs, enseignants-chercheurs, personnels techniques, doctorants ou apprentis.

Il assure la gestion courante RH (suivi des congés, arrêts maladie, télétravail, temps partiels ...) ainsi que le suivi des dossiers de carrière des personnels permanents. Il instruit et effectue le suivi administratif des dossiers de recrutement des contractuels

et des doctorants (50 recrutements/an), des conventions de stage (70 stagiaires/an) ainsi que les formalités d'accueil des visiteurs (100 visiteurs/an) ; il prend en charge l'accueil des personnes recrutées en leur apportant toutes les informations pour faciliter leur intégration dans le tissu local et au sein du laboratoire.

Depuis la qualification du LPSC en unité sensible en 2023, le pôle coordonne toutes les informations nécessaires au dossier de demande d'accueil en ZRR<sup>1</sup> et instruit cette demande auprès du FSD<sup>2</sup> de l'UGA (120 dossiers/an).

Il tient à jour les bases de données du système

- 1 Zone à Régime Restrictif  
2 Fonctionnaire Sécurité Défense

d'information RH du laboratoire pour être en capacité de répondre aux enquêtes des différentes tutelles, dont l'évaluation HCERES.

Avec la correspondante formation du laboratoire, le pôle Ressources humaines coordonne et met en œuvre le Plan de Formation de l'Unité : recensement des demandes de formation, diffusion des offres de formation, instruction des demandes d'inscription (190 demandes de formation exprimées au PFU en moyenne chaque année, 100 agents formés en moyenne chaque année, 140 actions de formation en moyenne chaque année). Il assure également la gestion des crédits affectés à la formation permanente des agents.

## Le pôle ressources financières

Le pôle Ressources financières assure d'une part l'élaboration et le suivi du budget du laboratoire. En 2023, le budget du laboratoire s'élève à 16,2 M€ masse salariale et toutes sources de financement incluses, dont 30 % du budget de fonctionnement est assuré sur ses ressources contractuelles. En lien avec les services financiers et comptables des trois tutelles du laboratoire, le pôle assure la programmation, l'exécution et le suivi consolidé des données budgétaires selon les dispositions de la GBCP. Le pôle exécute chaque année plus de 5000 actes administratifs en engagement de dépenses et certification du service fait, émission d'ordres de mission et suivi des états de frais, gestion des immobilisations. Pour mener à bien ces activités, les cinq gestionnaires sont chargées d'un portefeuille d'équipes de recherche et de services techniques.

D'autre part, le pôle Ressources Financières participe au montage des dossiers de projets et de collaborations de recherche, que ce soient des coopérations internationales, des projets européens ou régionaux, des réseaux nationaux ou des coopérations industrielles. En étroite collaboration avec les services partenariats et valorisation des tutelles, il apporte auprès des chercheurs son expertise juridique et administrative pour l'élaboration des dossiers. Il participe aux réunions du Comité de Revue Technique de Projet (CRTP), et assure régulièrement la justification d'exécution des contrats. De 2022 à 2024, 52 contrats de recherche et prestations ont été gérés, dont 10 contrats européens et 8 contrats ANR ; le LPSC émerge également à plusieurs autres dispositifs de soutien à la recherche dont un IRT (NANOIELEC), trois Labex (ENIGMASS, FOCUS et PRIMES) et deux Equipex+ (PACIFICS, NEWGAIN). Dans le cadre du programme France 2030, le laboratoire a obtenu deux contrats avec la BPI pour la jouvence des équipements. Par ailleurs, le laboratoire accueille de nombreux doctorants, des cofinancements avec des partenaires industriels sont nécessaires, et des contrats de collaborations de recherches sont signés.

## Le pôle Logistique

Ce pôle a en charge la réception des commandes ainsi que la gestion et l'entretien des véhicules administratifs du site de Grenoble. Il assure également la fonction vagemestre sur l'agglomération grenobloise.

## Faits marquants

Le dynamisme maintenu des équipes de recherche dans la recherche et l'obtention de contrats de financement se traduit par un niveau d'activité soutenu du service SAF, tant au pôle RH, pour assurer les recrutements de doctorants et postdoctorants ainsi que l'accueil de stagiaires, qu'au pôle Ressources Financières, pour gérer les contrats de recherche ainsi que la gestion courante des missions et achats et relatifs à ces contrats.

Dans la prolongation des actions de dématérialisation initiées durant la pandémie Covid en 2020-2021, le service poursuit son effort d'intégration de démarches dématérialisées entre ses pôles et les agents du laboratoire. Des formulaires de gestion RH ont été optimisés (gestion des stages, gestion des contacts d'urgence...) et un nouvel outil de gestion dématérialisée des demandes d'achat couplées au service-fait a été développé et testé pour une mise en service programmée en janvier 2025.

En 2023, le LPSC a procédé à une refonte et modernisation de son intranet. L'ensemble des consignes et procédures relatives aux activités du service Administratif et Financier ont été révisées. Leur présentation sur l'intranet a été réorganisée dans une approche utilisateur clarifiée.

En 2023, la qualification du LPSC en Unité Sensible a induit la nécessité de mettre en œuvre la réglementation en matière d'accueil des agents en ZRR. Des supports informatifs ont été réalisés et des assemblées générales ont été organisées auprès des personnels du laboratoire. La procédure formelle de demande d'accès auprès du ministère par l'intermédiaire du FSD a été intégrée dans le processus de gestion RH, induisant des délais complémentaires avant accueil. La réglementation intérieure du laboratoire a été révisée et un registre numérique de recensement des invités a été formalisé. Une application dédiée à la gestion des demandes d'accueil en ZRR (HOPN) a été développée par l'UGA et déployée dans les laboratoires en novembre 2024. Les procédures du LPSC ont été actualisées et communiquées aux agents.

Le programme ESR de dématérialisation de la gestion des missions s'est déployé en 2023 au sein du CNRS puis en 2024 au sein de l'UGA. Les demandes de mission sont formalisées au sein de nouvelles applications (ETAMINE et NOTILUS pour le CNRS, NOTILUS pour l'UGA).

Afin d'accompagner les agents du laboratoire dans ce changement, le pôle Ressources Financières a établi des documents support et organisé plusieurs assemblées générales de présentation des procédures et des outils.

Chaque établissement tutelle a fait évoluer son système d'information financier afin de le coupler à son instance NOTILUS, impliquant des changements opérationnels de gestion au sein du pôle Ressources Financières. Toutes les gestionnaires ont été formées aux nouveaux environnements de travail.

En 2023, le LPSC a fait l'objet d'un audit du service Financier et Comptable de la délégation régionale Alpes. Les conclusions, mettant en avant une bonne gestion du laboratoire, ont été présentées au Conseil d'Unité.

En lien avec les services de la délégation régionale du CNRS, le laboratoire s'est engagé dans une actualisation des tarifications de ses plateformes. Ainsi, la tarification de la plateforme GENESIS a été réalisée et une planification de la tarification du LSM a été négociée pour 2025.

En 2024, un Comité Technique Administratif (CTA) a été institué. Cette instance est composée de huit membres permanents représentant les équipes et services du LPSC ainsi que les responsables du SAF. Le CTA a pour objectif de renforcer les liens entre les personnels du laboratoire et le service SAF dans une démarche d'amélioration continue : analyse et explicitation des règles de gestion pratiquées, étude de propositions d'amélioration, suivi des projets d'amélioration continue, proposition de communications élargies aux agents du laboratoire.

# SERVICE DOCUMENTATION

## Membre permanent

Emmanuelle Vernay.

Les missions essentielles du service Documentation sont la fourniture de ressources documentaires pour les personnels du laboratoire et la valorisation des publications du LPSC et des laboratoires de l'IN2P3.

## Missions et organisation

Le service Documentation assure la gestion des ressources documentaires du LPSC : l'administration et le suivi du fonds papier et des abonnements numériques ainsi que la fourniture de tout document nécessaire aux activités de l'ensemble des personnels du laboratoire. Des formations portant sur les modalités d'accès aux ressources numériques institutionnelles sont assurées, notamment aux nouveaux entrants. Fin 2023, a commencé une opération de désherbage du fonds documentaire portant sur les

revues, ouvrages et thèses en assurant la validité des données dans le SIGB (système intégré de gestion de bibliothèque) Koha de l'IN2P3.

Une très grande partie de l'activité du service est dédiée à accompagner, soutenir et valoriser le personnel publiant en contribuant à l'exhaustivité et à la qualité des métadonnées dans la base INSPIRE et l'archive ouverte HAL. Les prérogatives d'administrateur du portail HAL-IN2P3 et de modérateur permettent la curation et la normalisation des données des publications, structures et auteurs IN2P3 dans HAL. Ces dernières années, l'alimentation des rubriques « publications » du CRAC (compte rendu annuel d'activité chercheur) à partir de HAL a donné lieu à un surcroît d'activité et d'échange avec les personnels des différents laboratoires de l'IN2P3.

# SERVICE DÉTECTEURS ET INSTRUMENTATION

## Membres permanents

Mohammed Chala, Florent Collovati, Mathieu Da Silva, Olivier Guillaudin, Sara Marcatili, Julien Marpaud, Marc Marton, Jean-François Muraz (chef de service), Melvyn Reynaud, Adeline Richard Termini, Murielle Rousseau, Yoann Sallaz Damaz (chef de service adjoint depuis Juillet 2024), Nadine Sauzet, Patrick Stassi (chef de service adjoint jusqu'en Juin 2024), Olivier Zimmermann.

## Membre non permanent

Abdelkader Mohammed Matallah (Stagiaire DU2i puis CDD).

Le Service Détecteurs & Instrumentation (SDI) conçoit, réalise, teste et met en œuvre des dispositifs instrumentaux pour les expériences du laboratoire. Il intervient dans de nombreux domaines tels que les détecteurs de particules, le spatial, les accélérateurs, ou encore les applications médicales. Il assure également une expertise pour le développement de nouveaux détecteurs dans les domaines de recherche couverts par l'IN2P3. Enfin, il dispense un nombre important d'enseignements pour l'Université Grenoble Alpes, Grenoble INP ainsi que pour la formation continue des agents CNRS.

## Missions et organisation

Les missions principales du Service Détecteurs & Instrumentation sont :

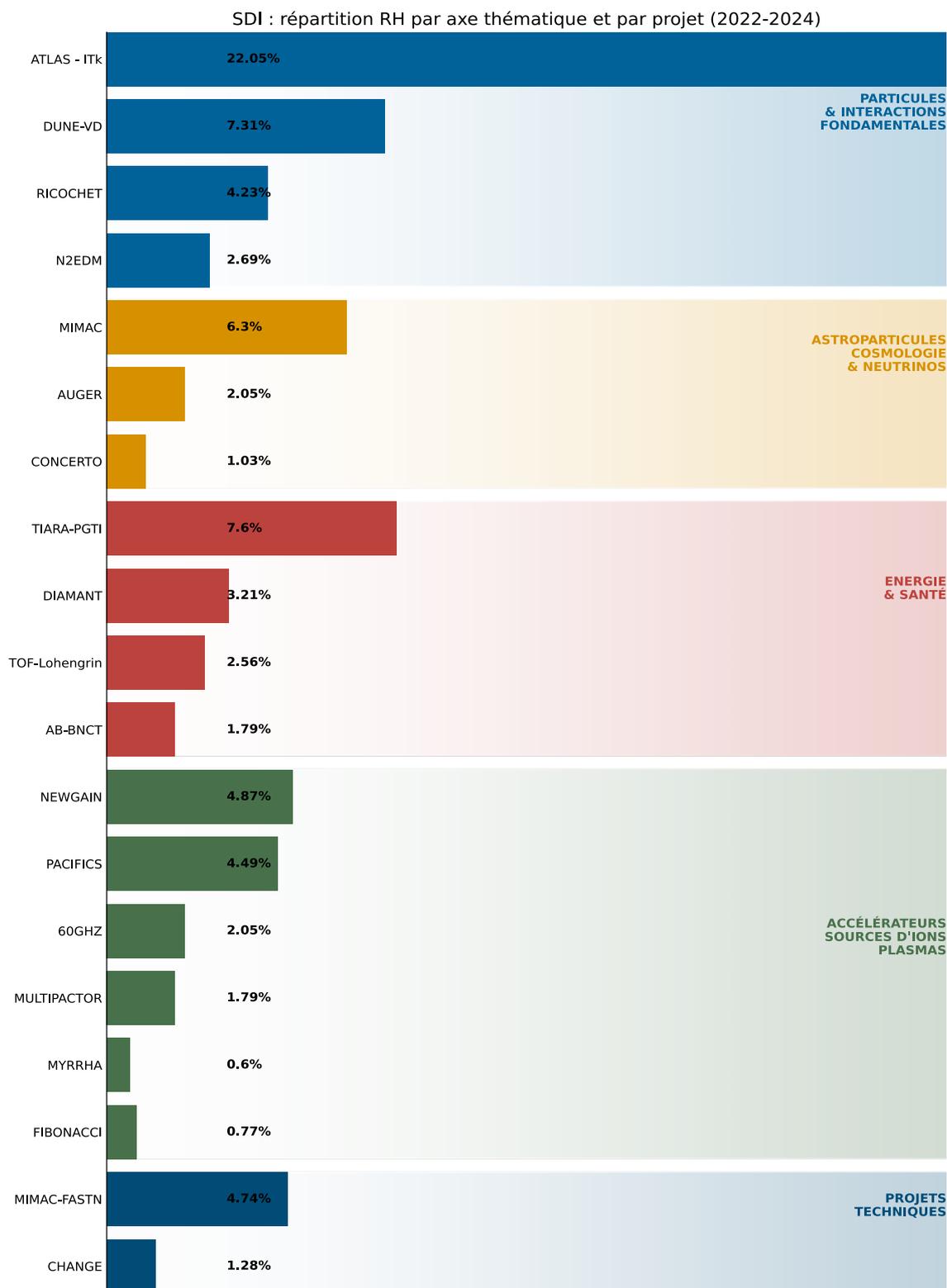
- les études, les développements, les réalisations, les mises en œuvre et la maintenance d'ensembles instrumentaux ;
- les études et les développements de nouvelles technologies ;
- l'assistance au fonctionnement des expériences ;

Le service assure également la responsabilité technique de la Plateforme d'Instrumentation et de Physique Subatomique mutualisée entre l'UGA et Grenoble INP (20 TP, 500 étudiants accueillis annuellement) ainsi que du Laboratoire des Basses Activités (LBA)

Composé de 15 personnes fin 2024 (14 permanents + 1 AI CDD ; 6 IR dont 2 Phd et 1 HDR, 3 IE, 5 AI, 1 T), le SDI est organisé en quatre pôles de compétences :

- Développement détecteur
- Étude, montage, intégration, test
- Contrôle-commande et acquisition des données
- Chimie et matériaux

# Implications sur les projets scientifiques et techniques



De 2022 à 2024, les agents du SDI (13.05 FTE/ an) ont consacré 82 % de leur temps sur projet (soit 10.71 FTE/an), les 18 % de temps restant (soit 2.34 FTE/an) ont été consacrés aux nombreuses fonctions institutionnelles assumées par le service dont

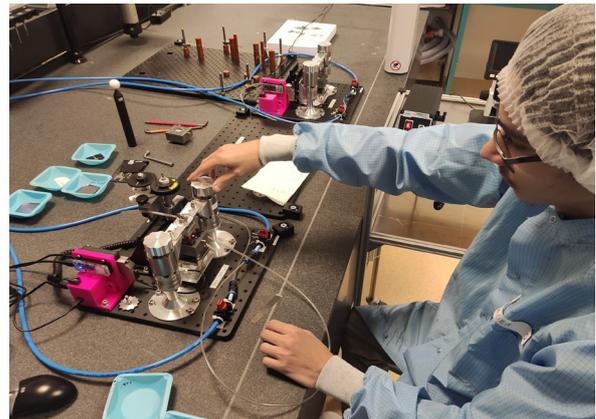
plusieurs majeures telles que la responsabilité opérationnelle de la plateforme LSM, la responsabilité technique de la Plateforme d'Instrumentation et de Physique Subatomique, les coordinations des réseaux IN2P3 Photodétection ainsi que Contrôle-Commande.

# Focus et sélection de faits marquants durant la période 2022-2024

## ATLAS-ITk

Le SDI assure la responsabilité technique du montage de 900 des 4472 modules pixel sur les supports locaux de l'Outer Barrel. Ceci implique différentes étapes : tests électriques collage, métrologie, tests thermiques (-55°C à 20°C) et intégration. Les précisions micrométriques nécessaires et l'extrême fragilité des objets manipulés ont nécessité la conception d'outils innovants en collaboration avec le CPPM. Durant la période 2022-2024, le SDI a mené à bien l'optimisation des outils de collage, la mise en place de l'infrastructure nécessaire à la chaîne de production en salle blanche, ainsi que l'assemblage et la qualification de l'enceinte des tests électriques et thermiques. Le service a également pris en charge le développement logiciel de l'interlock et du « slow-control » de cette enceinte qui est

commune aux 6 sites d'intégration (un en Suisse, un en Allemagne, deux en France et un au Japon).



(Crédit : Yoann Sallaz-Damaz, LPSC, CNRS).

Collage d'un module en salle blanche.

## DUNE – Vertical Drift

Le LPSC a pris en charge l'assemblage et le test de 72 des 80 plans de détection (CRP) constituant la partie haute de la TPC à argon liquide à drift vertical du projet DUNE. Le SDI assure la responsabilité de l'assemblage, de l'intégration, de la validation et du test (AIVT) pour l'ensemble du consortium CRP du

projet. Au cours de la période 2022-2024, le SDI a très fortement contribué à la mise en place au laboratoire de la chaîne de production des CRP ainsi qu'au développement des dispositifs de mesure de niveau qui seront utilisés pour positionner les CRP dans le détecteur DUNE-VD avec une précision de quelques centaines de microns.



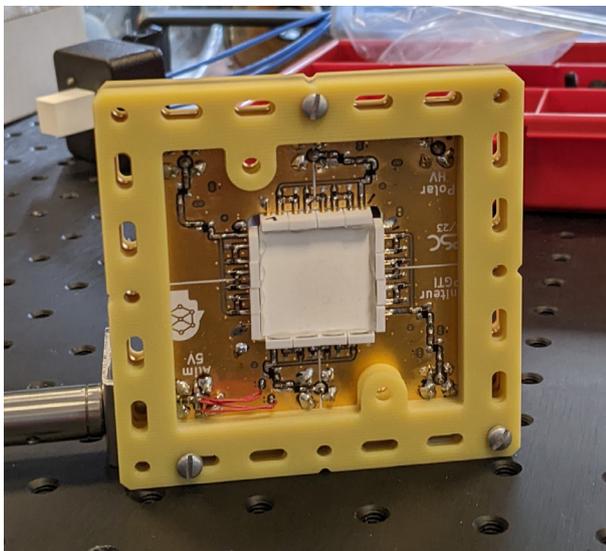
(Crédit : Jean-François Muraz, LPSC, CNRS).

Assemblage du CRP-7 au CERN.

### TIARA-PGTI

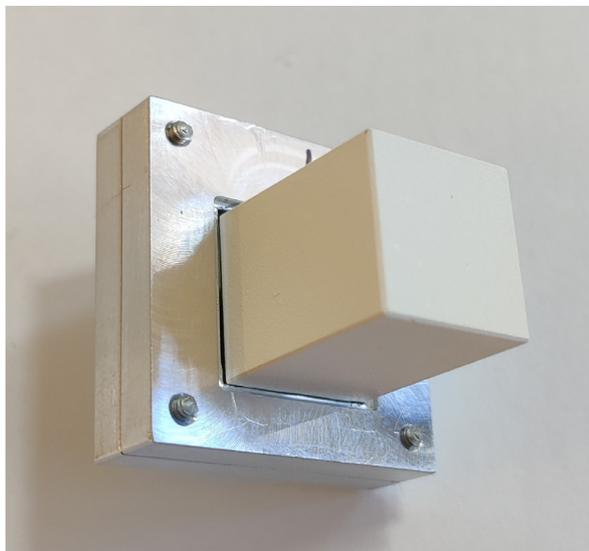
Ce projet, financé par un ERC starting grant et mené en collaboration avec le centre de protonthérapie de Nice et le CPPM, s'inscrit dans le contexte du contrôle en ligne de traitements de hadronthérapie. Le LPSC développe un détecteur (TIARA)

composé d'un moniteur faisceau basé sur un scintillateur plastique rapide, lu en coïncidence temporelle avec un ensemble de détecteurs gamma basés sur des radiateurs Tcherenkov. L'excellente résolution temporelle du système, de l'ordre de 100 ps RMS, et son insensibilité aux neutrons permettent d'atteindre une résolution millimétrique sur le parcours de l'hadron à l'échelle d'un spot d'irradiation.



(Crédit : Sara Marcatili, LPSC, CNRS).

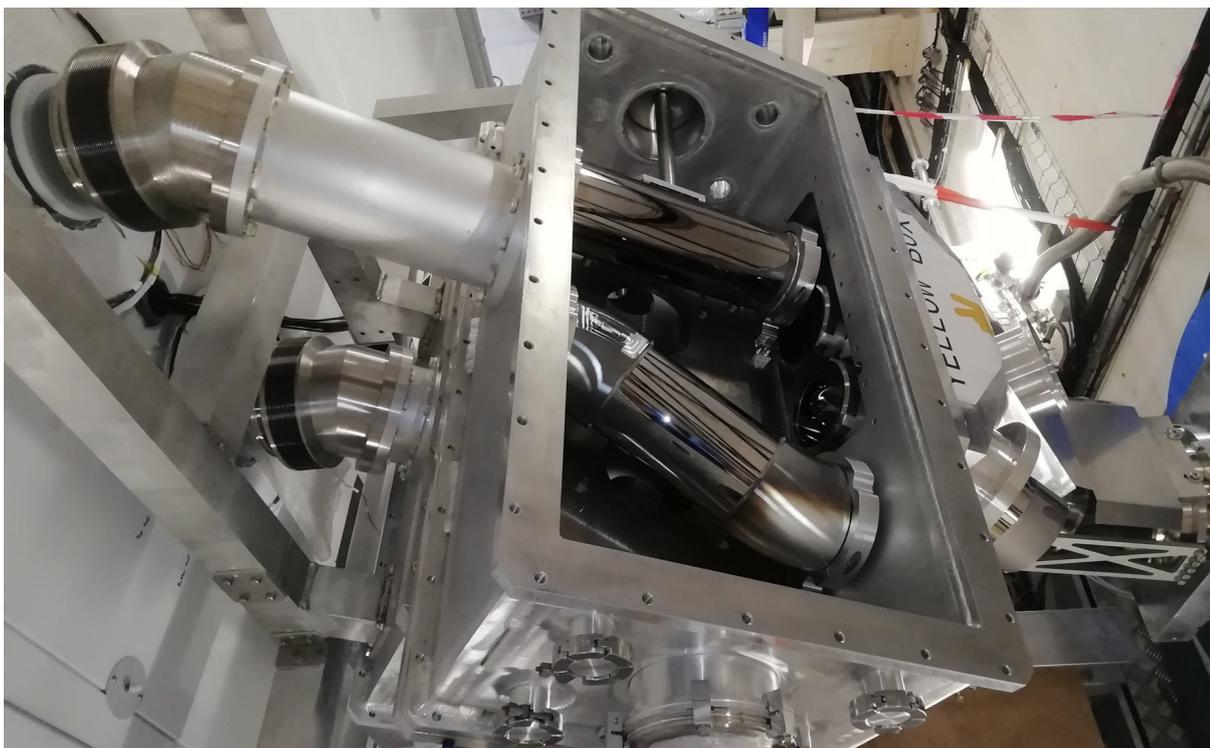
Moniteur faisceau et détecteur gamma.



### Switch n2EDM

Le SDI a participé au contrôle-commande du switch qui est maintenant fonctionnel et installé en 2022 à PSI (Institut Paul

Scherrer). Le SDI a conçu l'armoire électrique qui est basée sur des automates Beckhoff, et réalisé le logiciel de pilotage du switch (C/C++) ainsi que l'interfaçage entre l'acquisition principale et l'instrument.



(Crédit : Johann Menu, LPSC, CNRS).

Switch UCN motorisé à PSI (Suisse).

# Compétences et moyens matériels

De par la diversité des profils des agents du service, le SDI possède un très large spectre de compétences. Il dispose d'expertises reconnues et de premier plan, regroupées dans chacun de ses 4 pôles de compétence :

## Pôle développement détecteurs :

Ce pôle est constitué d'ingénieurs de recherche publiant. Leurs domaines de compétences couvrent la plupart des domaines de la physique des détecteurs : photodétection (scintillateurs, détecteurs Cherenkov, PMT, SiPM...), détecteurs gazeux (à fils, à micro-motifs...), détecteurs semi-conducteurs (silicium, diamant), les simulations physiques et multiphysiques (GEANT4, SRIM, COMSOL, HFSS) ainsi que l'analyse et l'interprétation des données (ROOT, C++, Python)

## Pôle étude, montage, intégration, test :

Les missions opérationnelles de ce pôle concernent la conception (CAO 3D), l'assemblage, le câblage, l'intégration et les tests de validation de détecteurs pour la physique et leurs applications. Les technologies mises en œuvre sont le vide, la cryogénie, la haute tension (<50 kV) ainsi que les collages.

## Pôle contrôle-commande et acquisition des données :

Les activités de ce pôle sont centrées sur le développement d'applications de contrôle-commande et d'acquisition de données classiques, embarquées, d'IoT, d'automates et de sécurité des installations. Les logiciels couramment utilisés sont LabVIEW, C et C++, EPICS, Python, Ladder et Javascript.

## Pôle chimie et matériaux :

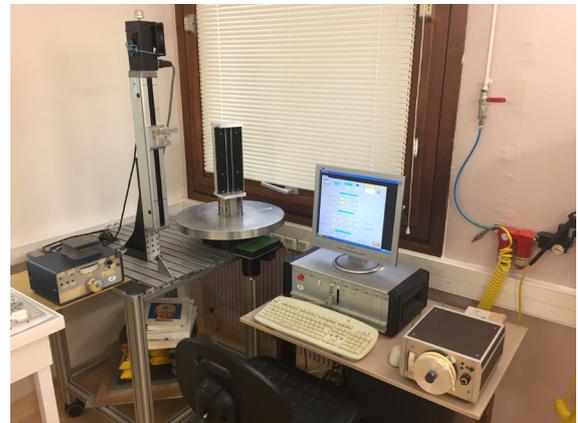
L'existence de ce pôle est liée à la présence dans le service de l'unique ingénieure chimiste du laboratoire. Ses activités exercées concernent la réalisation de sels fondus à hautes températures pour des applications dans des systèmes nucléaires, les dépôts par évaporation, les couches minces, ainsi que la gestion des gaz et des liquides cryogéniques pour l'ensemble du laboratoire.

Le SDI est également très fortement sollicité pour son expertise dans les domaines de la gestion de projets, de l'assurance produits, de l'analyse des risques projets et de l'audit interne.

Le SDI possède également plusieurs compétences rares :

- Tissage de fils

Le SDI a su maintenir son savoir-faire dans le domaine du tissage de fils. Cette technologie est couramment utilisée pour réaliser des chambres à fils, des grilles accélératrices ou encore des polariseurs. Le service dispose d'un banc de tissage automatique d'une capacité de 400 x 400 mm<sup>2</sup> et réalise régulièrement des tissages, notamment dans le cadre de prestations.



(Crédit : Marc Marton, LPSC, CNRS).

Banc de tissage automatique de fils.

- Montage de diamants

Depuis 2010, le SDI a développé des techniques spécifiques pour le montage de diamants de toutes tailles (jusqu'à 400 mm<sup>2</sup>). Ce savoir-faire profite aux nombreux projets menés par l'équipe de recherche Physique Nucléaire et Applications Médicales mais également pour des équipes de l'ILL (Institut Laue-Langevin) et de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire).



(Crédit : Jean-François Muraz, LPSC, CNRS).

Hodoscope (Diamant polycristallin 2x2 cm<sup>2</sup>).

## Activités de R&D et/ou Valorisation

Les activités R&D du SDI sont centrées essentiellement sur le développement de détecteurs innovants. Les domaines concernés sont les détecteurs gazeux (amélioration de la transparence des chambres à fils, détecteurs micromégas bas bruits) ainsi que la photodétection (amélioration de la résolution en temps - 100 ps - par couplage de SiPM et de détecteurs Cherenkov).

Au cours de la période 2022-2024, grâce à son savoir-faire et à ses équipements, le SDI, en collaboration avec l'IJCLab à Orsay et le GANIL à Caen, a obtenu un financement dans le cadre des programmes de Recherche & développements Technologiques IN2P3 afin de développer des CHAmbres à fils de Nouvelle GEnération (CHANGE) hautement transparentes basées sur des fils d'aluminium et de carbone. Plusieurs prototypes ont été réalisés et annoncent une technologie très prometteuse.

---

## Activités de formation

Le SDI assure et intervient dans plusieurs actions de formation et d'enseignement, auprès de la formation permanente de la délégation régionale Alpes, au sein de l'UGA pour laquelle plusieurs agents du service

assurent de nombreux travaux pratiques et travaux dirigés dans divers cursus, pour la filière PHELMA de Grenoble-INP, ainsi que dans le cadre de la formation des futurs physiciens médicaux dispensée par l'INSTN-CEA (Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires).

# SERVICE ÉLECTRONIQUE

## Membres permanents

Julien Bounmy, Jean-Luc Bouly, Olivier Bourrion (responsable de service), Olivier Choulet, Ludovic Eraud, Laurent Gallin-Martel, Christophe Hoarau, Eric Lagorio, Nicolas Ponchant, Fatah Rarbi, Olivier Rossetto, Emmanuel Tourba, Damien Tourres (responsable de service adjoint), Mahfoud Yamouni, Jonathan Waquet.

## Membres non permanents

Mounir Abdkrimi (doctorant), Cairo Caplan (CDD), Elian Conrat (apprenti), Brice Gogu  Meunier (apprenti), Dimitri Huin (apprenti), Oum ima Jaafoura (CDD), Pierre Paris (CDD), Lunes Peltier (CDD).

**Le rôle du service électronique est de concevoir et maintenir des électroniques à l'état de l'art pour les expériences de physique du laboratoire. Ainsi, il intervient de la spécification du besoin jusqu'à la mise en service et validation de la solution, en passant par sa conception.**

## Missions et organisation

Le service électronique est composé de 18 personnes, dont 13 agents permanents (fin 2024). Il conçoit les systèmes électroniques ainsi que les capteurs PCB pour les expériences de physique du laboratoire. Le service est organisé en quatre pôles :  lectronique système, microélectronique, Conception Assistée par Ordinateur (CAO) de circuits imprimés et automatisation & instrumentation.

Le pôle électronique système (6 permanents, 1 CDD, 1 doctorant et 1 apprenti) est en charge de la conception de systèmes analogiques très bas bruit et/ou radiofréquence ainsi que de systèmes mixtes ou purement numériques à destination de contrôle commande ou d'acquisition de données. Il a également une forte compétence dans la mise en œuvre de FPGA et de microcontrôleurs.

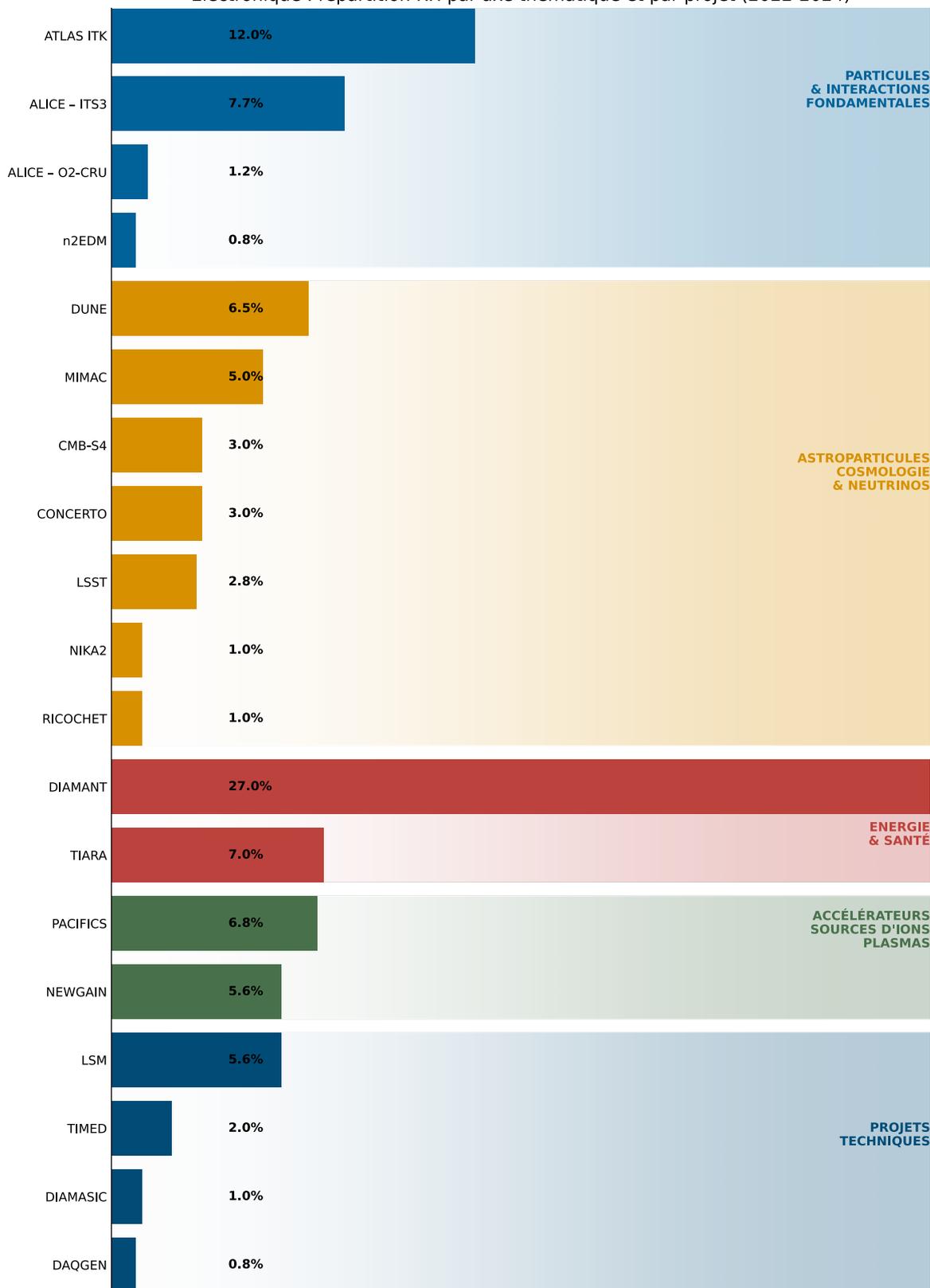
Le pôle microélectronique (2 permanents et 1 apprenti) conçoit tout ou pour partie les circuits intégrés spécifiques permettant un fort niveau d'intégration, de faibles consommations, des performances inatteignables avec des solutions non intégrées.

Le pôle CAO de circuits imprimés (2 permanents) se charge de simuler et dessiner les circuits imprimés nécessaires pour les réalisations du service. Cela inclut la prise en compte des contraintes mécaniques et d'environnement (température, radiations) et la phase d'industrialisation.

Le pôle automatisation et instrumentation (3 permanents et 1 CDD) remplit les missions transverses du service, à savoir la conception de systèmes complexes d'interconnexion, la mise en œuvre de solutions de caractérisation de détecteurs et enfin la mise en œuvre d'automates programmables.

# Implications sur les projets scientifiques et techniques

Electronique : répartition RH par axe thématique et par projet (2022-2024)



De 2022 à 2024, le Service Électronique a contribué à 20 projets du LPSC. Cette répartition reflète en partie les projets majeurs du service (DIAMANT, ATLAS ITK, DUNE, PACIFICS et NEWGAIN) car l'activité du service sur les projets nationaux suivi

par l'IN2P3 concerne moins de 10 ETP (Équivalent Temps Plein). Les R&T locales, comme le projet d'évolution du système de lecture des détecteurs KIDS, ainsi que les activités de support général, n'apparaissent pas dans ce tableau.

## Focus et sélection de faits marquants durant la période 2022-2024

### Projet readout KID : Électronique de lecture pour détecteurs à inductance cinétique (KIDs)

Le service électronique a conçu et mis en service des systèmes d'acquisition pour la lecture de détecteur KIDs utilisé dans les applications de radioastronomie (NIKA2, KISS, CONCERTO). Chacune des cartes de lecture met en œuvre directement sur FPGA le traitement du signal de premier niveau pour bénéficier d'une forte parallélisation des calculs. Le dernier système en date (CONCERTO) est capable de couvrir une largeur de bande de 1 GHz et d'instrumenter

jusqu'à 400 KIDs. Afin de préparer les instrumentations futures, une jouvence de cette électronique est en cours de validation. L'objectif est d'instrumenter au moins 600 KIDs et de couvrir une largeur de bande de 1,5 GHz tout en minimisant la consommation. En parallèle de cette jouvence matérielle, une étude poussée et une optimisation de la chaîne de traitement du signal en cours, par le biais d'une thèse.

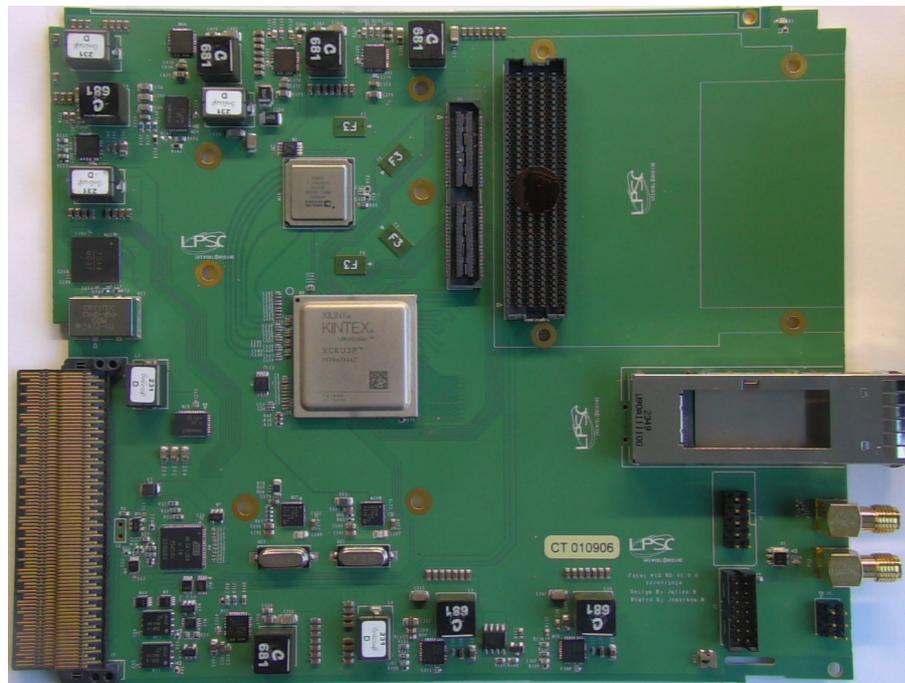


Figure 1 (Crédit : Julien Bounmy, LPSC, CNRS).

Prototype de carte d'excitation et de lecture de détecteurs KIDs. Celle-ci fonctionne avec des convertisseurs à 6 Géc/s et une chaîne radiofréquence couvrant une plage de 1,3 GHz à 3 GHz. Elle met en œuvre directement sur FPGA le traitement du signal de premier niveau pour bénéficier d'une forte parallélisation des calculs.

## Projet physique nucléaire et applications médicales

Le service a développé des électroniques de lecture de détecteurs diamant utilisés dans différents projets de physique pour les applications médicales. Il s'agit principalement de monitoring faisceau en hadronthérapie ainsi qu'en traitement par micro-faisceaux issus du rayonnement synchrotron (MRT). Ces électroniques (en versions discrètes ou intégrées) permettent, en fonction des projets, la localisation XY et le marquage temporel du faisceau, ainsi que la mesure de la charge créée dans les détecteurs. Le service électronique fourni également le firmware et le software pour chacune des électroniques de lecture.

Pour le projet IDSYNCHRO (MRT à l'ESRF) le service a développé l'électronique d'un détecteur

permettant la localisation des micro-faisceaux ainsi que la mesure de charge. Ce détecteur est constitué d'une matrice de diamants monocristallins de grande taille (huit diamants juxtaposés de  $4.6 \times 5.6 \text{ mm}^2$  et de  $150 \mu\text{m}$  d'épaisseur) avec une métallisation par micropistes ( $172 \mu\text{m}$ ) permettant de détecter chaque micro-faisceau et chaque intervalle entre micro-faisceaux, représentant 136 voies de lecture au total. L'électronique de lecture et d'acquisition développée au LPSC est composée d'une vingtaine de circuits ASIC d'intégration de charge ayant une dynamique de plus de trois ordres de grandeur, d'un système d'acquisition (FPGA et microcontrôleur) et d'un circuit imprimé qui sert également de support aux diamants.

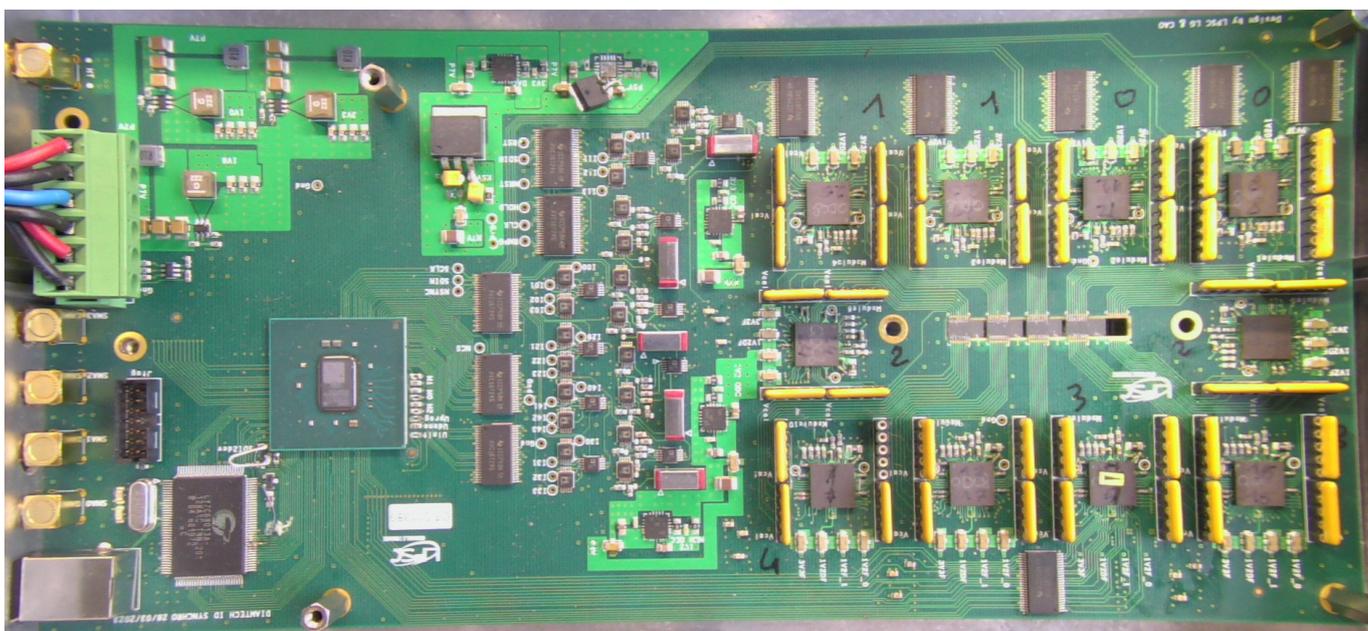


Figure 2 (Crédit : Laurent Gallin-Martel, LPSC, CNRS).

Photo du système combiné détecteur/électronique de lecture pour le projet IDsynchro. Le système numérique de lecture est à gauche (FPGA+ microcontrôleur USB), les 2x4 capteurs diamants sont au centre sur la partie droite, ils sont lus par les 2x10 ASICs disposés autour.

## Projet DUNE : électronique de lecture des capteurs de niveau d'Argon liquide

Dans le cadre de la contribution du laboratoire à la construction du détecteur DUNE, le service électronique conçoit les capteurs de niveau ainsi que de l'électronique de lecture associée. Les capteurs voient leur capacité changer en fonction du niveau d'immersion dans l'Argon liquide. L'électronique de lecture, conçue autour d'un FPGA et de circuits intégrés

dédiés à la mesure précise de capacité se charge de faire cette lecture et acquisition de données. La lecture doit pouvoir être relativement rapide (jusqu'à 10 mesures par seconde) pour permettre un bon positionnement des Charge Readout Plane (CRP) lors de leur mise en place. Pour être compatible avec les spécifications système de l'expérience, la communication avec l'électronique se fait par Ethernet via une fibre optique.

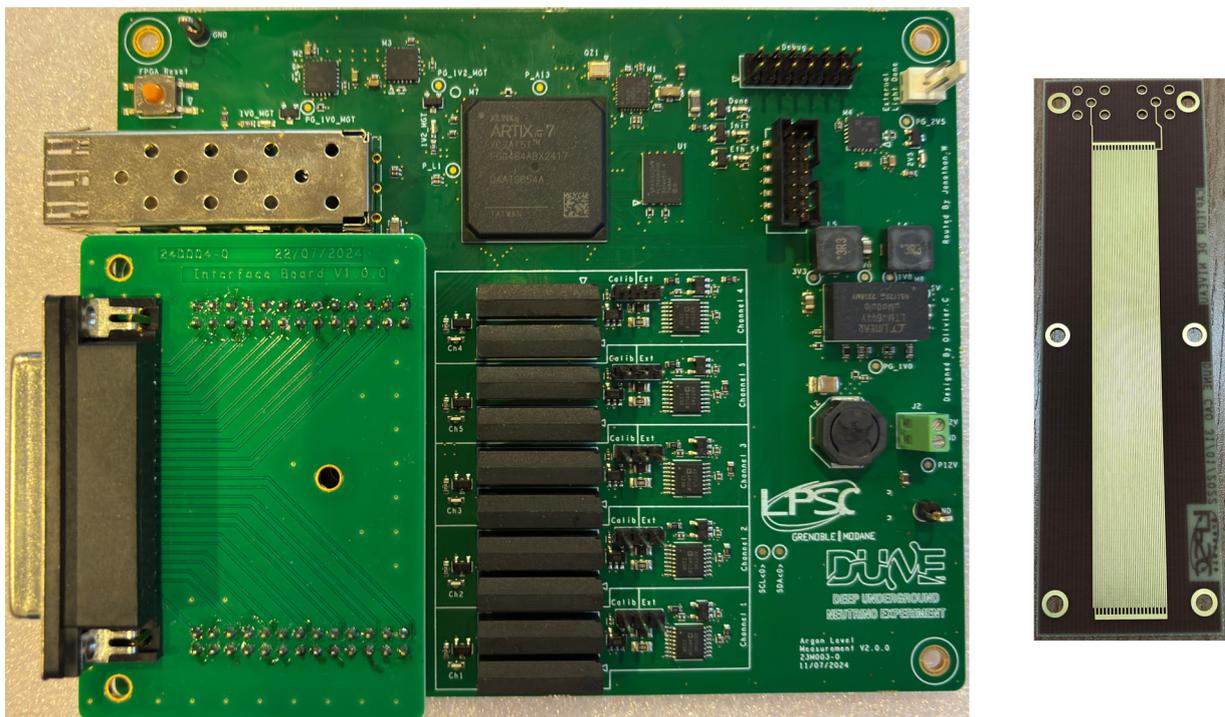


Figure 3 (Crédits : Jonathan Waquet et Jean-François Muraz, LPSC).  
À gauche, prototype de l'électronique de lecture de 5 capteurs capacitifs et 5 capteurs thermiques. À droite 1<sup>er</sup> prototype des capteurs PCB de niveau d'Argon Liquide.

# SERVICE ÉTUDES ET RÉALISATIONS MÉCANIQUES

## Membres permanents

Romain Bourroux, Pierre Delebecque, Pierre Olivier Dumont, Nicolas Emeriaud, Julien Giraud, Denis Grondin (chef de service), Mile Kusulja, Johann Menu, Dominique Morotti, Yvan Odièvre, Eric Perbet, Gilles Raffin, Samuel Roni, Sébastien Roudier (adjoint au chef de service), Francis Vezzu (responsable du bureau d'études), Lucie Vivargent.

## Membres non permanents

Valentin Caraux (apprenti), Jean Foulard (CDD), Marie Giannoni (CDD), Claude Guillorit (CDD), Yann Herpin (CDD), Guillaume Huet (CDD), Florian Kiener (CDD).

Le Service Études et Réalisations Mécaniques (SERM) assure les différentes phases de conception, faisabilité, réalisation, mise au point, contrôle et montage sur site d'ensembles mécaniques, cryogéniques, d'installations sous vide et de systèmes de thermalisation, au sein de collaborations françaises et internationales. Le SERM accueille régulièrement des stagiaires et apprentis.

## Missions et organisation

Les prestations du SERM vont du soutien à la prise en charge complète de réalisations complexes. Nos moyens permettent la réalisation d'ensembles mécaniques, de chaudronnerie, de chambres sous pression et mécanismes sous vide, de systèmes de thermalisation, basse température et sous environnements spéciaux, d'installations hydrauliques et pneumatiques, de pièces et structures en composite ainsi que la motorisation et l'automatisation de systèmes. Le SERM assure des formations et ateliers de CAO CATIA et outils associés, d'usinage.

Le service est constitué (fin 2024) de 15 agents et est organisé en 3 activités :

- Bureau d'Études : 4 IR, 4 IE, 2 AI
- Atelier : 1 IE, 3 AI, 2 T
- Montage & Contrôle : 1 AI.

A noter que 3 agents hors du SERM ont rejoint l'activité du BE « Elargi » depuis 2020.

Le SERM dispose d'une expertise reconnue dans le domaine de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de la gestion de base de données techniques. Cela lui permet de jouer un rôle important de soutien auprès d'autres utilisateurs du laboratoire (30 agents formés – 15 utilisateurs réguliers, répartis sur 5 services) et ainsi d'accroître les compétences individuelles et collectives en conception mécanique. Trois de ses membres sont fortement impliqués dans le déploiement du nouvel outil de CAO 3D EXPERIENCE tant au LPSC qu'à l'IN2P3.

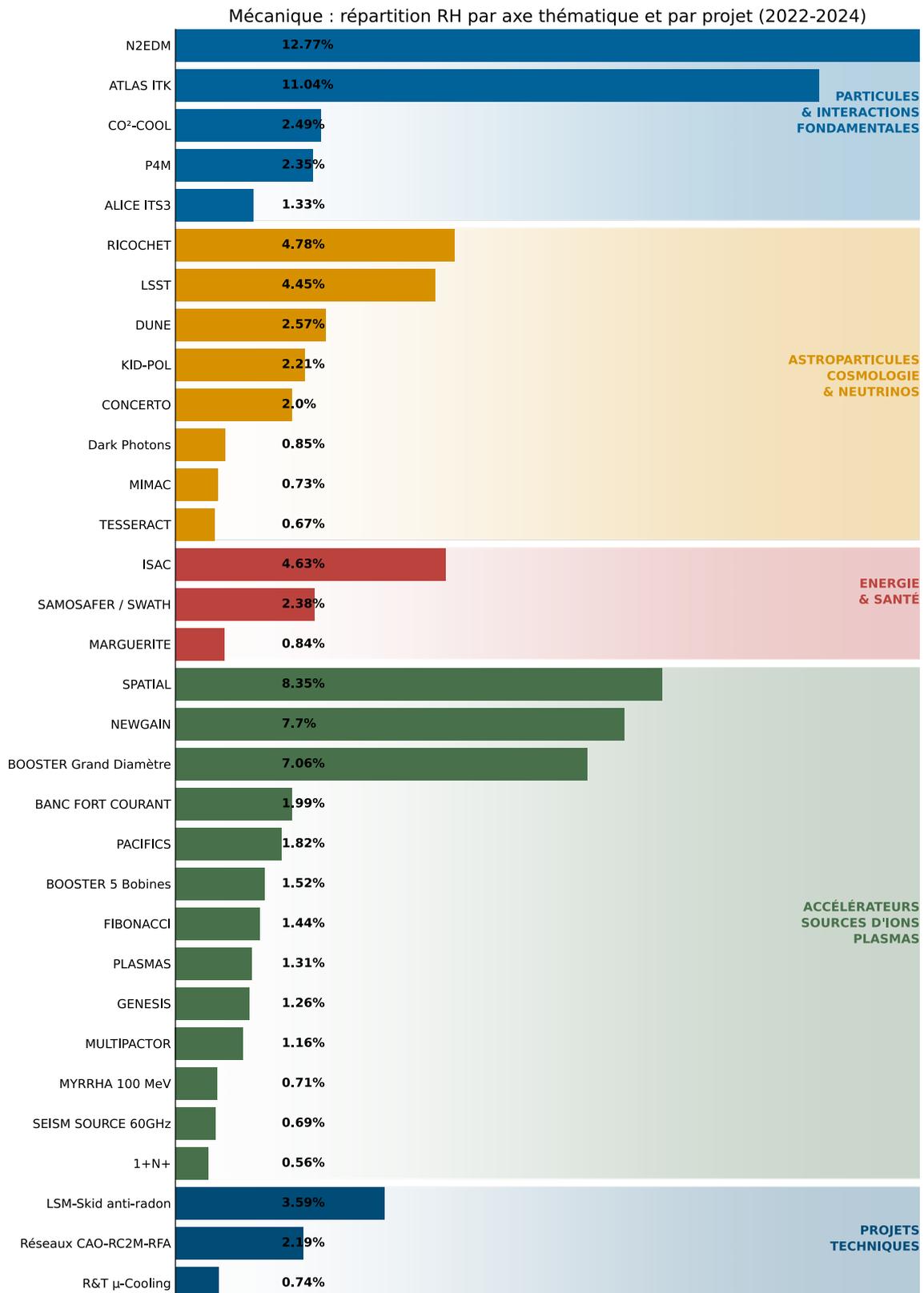
Des agents du SERM assurent également la responsabilité ou la coordination technique de projets :

- Coordination nationale du Réseau Calcul Mécanique et Multiphysique (RC2M) de l'IN2P3 ainsi que l'organisation et l'animation des écoles de calcul de l'Institut.
- Support national / réseau CNRS Fabrication Additive (RFA).
- Support national / réseau IN2P3 IAO-CAO / 3D EXPERIENCE et organisation de webinaires.
- Responsabilité Technique de la Plateforme de recherche expérimentale FEST (Fluids Experiments and Simulations in Temperature).

Le service est représenté dans plusieurs instances du laboratoire : CU (Conseil d'Unité), CHSCTL (Commission d'Hygiène, de Sécurité et des

Conditions de Travail Locale), CPL (Comité du Personnel Local). Il compte aussi le responsable des moyens CAO du laboratoire.

## Implications sur les projets scientifiques et techniques



De 2022 à 2024, le SERM a contribué à 43 projets techniques du LPSC, et chaque agent du service est impliqué dans un ou plusieurs projets, à différents stades d'implication, depuis les choix technologiques, la conception mécanique, le calcul, la réalisation (atelier ou suivi de prestataires), le montage sur site et la mise en route des expériences, jusqu'à la réalisation complète d'instruments. Le service assure aussi la coordination technique au LPSC pour plusieurs projets.

Les répartitions des RH sur projets qui suivent reflètent la part des projets majeurs du service, comme ATLAS-ITK, LSST, n2EDM et RICOCHET, les projets accélérateurs et sources d'ions.

## Focus et sélection de faits marquants durant la période 2022-2024

Plusieurs réalisations importantes et faits marquants relatifs aux projets dans lesquels le SERM est impliqué ont jalonné les activités de ces trois dernières années :

### n2EDM

Ce projet européen vise la réalisation du nouveau spectromètre pour la mesure du moment dipolaire électrique du neutron, dont l'installation a débuté en 2021 auprès de la nouvelle source de neutrons ultra froids (UCN) à l'Institut Paul Scherrer (PSI), en Suisse. Depuis 2019, le SERM assure la responsabilité technique de deux lots :

- le robot (Mapper) amagnétique permettant de réaliser la cartographie automatisée 3D du champ magnétique à l'intérieur du blindage.
- le switch motorisé, (système d'aiguillage, constitué de guides UCN mobiles ; l'intégration finale du switch UCN a été réalisée fin juin 2023 à PSI.



Figure 1 (Crédit : Johann Menu, LPSC, CNRS).

Installation finale du Switch UCN motorisé à PSI (Suisse).

### ISAC – FC3

Au sein du projet ISAC (Innovative System for Actinides Conversion) (BPIFRANCE 2022 - 2026), le SERM assure, après le développement et l'analyse des modèles numériques multi-physiques, la conception, la construction et la responsabilité technique, sur la Plateforme FEST, d'une boucle d'essai thermo-hydraulique avec un mélange de sel chlorure à T fusion  $\leq 600$  °C. Le montage de cette boucle à sel fondu chlorure FC3 (Forced Convection Chloride Circuit) permettra notamment de tester le bullage de gaz et la séparation de gaz dans un sel en circulation forcé. L'exploitation de la boucle débutera courant 2025.

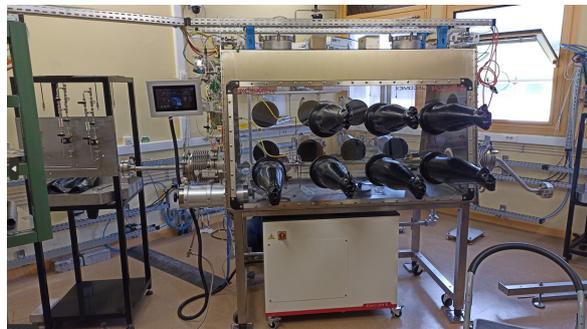
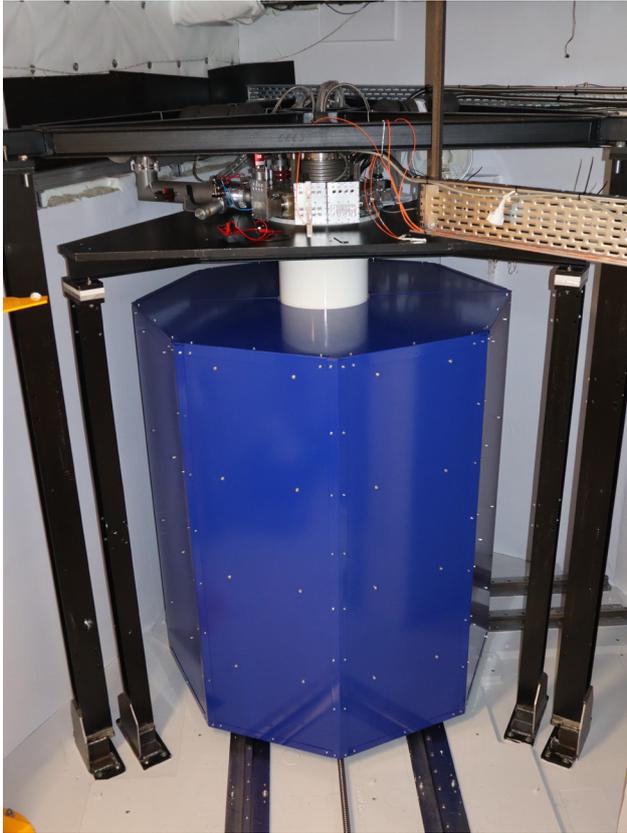


Figure 2 (Crédit : Julien Giraud, LPSC, CNRS).

Montage de la boucle à sel fondu chlorure FC3 au LPSC.



## RICOCHET

Le SERM a assuré depuis fin 2020 la conception, la construction et l'installation du blindage massif de 20 tonnes du cryostat Ricochet implanté au niveau C du réacteur de l'Institut Laue-Langevin (ILL) de Grenoble.

Il s'agit d'un blindage plomb de 20 cm entourant un blindage polyéthylène de 40 cm et d'une enceinte extérieure en fer doux, éléments maintenus par un châssis motorisé. La contrainte principale était l'ouverture complète du blindage dans l'espace dédié restreint afin de pouvoir accéder au cryostat.

Cet équipement a été installé à l'ILL fin 2023.

Figure 3 (Crédits : Collaboration RICOCHET, LPSC, CNRS).

Le blindage massif entourant le cryostat, à l'ILL.

## Rubin LSST - Chargeur de filtres

Depuis 2010, le SERM assure la coordination technique, au sein de ce projet visant la construction d'un télescope grand champ au Chili, de la fourniture complète de deux exemplaires d'un chargeur de filtres automatisé et des appareillages associés (système permettant le chargement et le déchargement des filtres à l'intérieur de la caméra du télescope). La collaboration regroupe le principal partenaire SLAC (USA), ainsi que le CPPM (Marseille) et le LPNHE (Paris).

La mise en service des deux équipements complets manipulant des filtres de forte valeur financière (1,5 M\$) a été réalisée dans la salle blanche de l'observatoire Vera C. Rubin au Cerro Pachón, au CHILI, à 2,682 m d'altitude, en juin 2024.

Figure 4 (Crédit : Francis Vezzu, LPSC, CNRS).

Le loader de filtres optiques installé sur la caméra, dans la salle blanche de l'observatoire Vera C. Rubin au Chili.



### **Mise à niveau des outils CAO, d'usinage et de métrologie**

Le remplacement définitif de CATIA V5 et SMARTTEAM par le nouveau logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) 3D Experience Platform de Dassault Systèmes est une amélioration majeure des outils de conception mécanique, qui a nécessité beaucoup d'efforts en 2023, tant pour le support technique que pour la formation auprès des 30 utilisateurs du laboratoire et les webinars spécialisés préparés au SERM à l'attention des utilisateurs de l'IN2P3. La mise à jour de 3D Experience vers la version R2024x sera effective au mois de novembre 2024.

L'évolution des outils s'est traduite aussi dans cette période par d'autres installations :

- Installation en 2023 d'un centre d'usinage vertical à Commande Numérique DMG CMX 600 V.
- Evolution du parc de 4 machines d'impression 3D plastique et résine dans la salle dédiée.

# Compétences et moyens matériels

Les compétences du SERM se situent dans des activités de conception, réalisation, montage et métrologie, sur différentes technologies, dans les domaines suivants :

## Études, conception et calculs

- Études et réalisations d'ensembles mécaniques de laboratoire et de grands instruments, pour les sources d'ions et les accélérateurs, intégrant des ensembles mécano-soudés, des installations hydrauliques, des systèmes de thermalisation...
- Techniques du vide primaire et secondaire ; modules de vide et cryogénie : chambres sous pression, mécanismes sous vide, hautes et basses températures.
- Composites : pièces structurelles et structures légères en pré-impregné carbone.
- Gestion de projets, coordination technique, assurance produit, documentation (support national / réseau IN2P3 IAO-CAO / 3D EXPERIENCE), analyse des risques.
- Mise en œuvre de systèmes d'acquisition de données (thermique, pression...).
- Simulations / calculs (RDM, calculs par éléments finis). Études de structures, thermiques, thermomécaniques, fluidiques, composites...
- Mise en œuvre de systèmes automatisés, contrôle commande.
- CAO (CATIA) - Installations et support logiciel au LPSC.
- Moyens spécifiques : logiciel de CAO : 3D EXPERIENCE et CATIA V6 ; logiciel de simulations/calculs : ANSYS.

## Atelier Mécanique

Sur 445 m<sup>2</sup>, il offre des prestations allant du soutien à la prise en charge de réalisations complexes, incluant la gestion de la sous-traitance. L'atelier dispose de moyens permettant la réalisation, le montage, le contrôle dimensionnel d'ensembles mécaniques ou mécano-soudés et notamment de pièces de précision usinées en 3D.

Moyens spécifiques : usinage traditionnel, machines à Commandes Numériques avec liaisons FAO, électroérosion à fil, contrôle dimensionnel avec bras 3D-6 axes-volume 2 m et colonne de mesure ; un atelier de

chaudronnerie / soudure. Une salle dédiée à l'impression 3D, procédés DLP (Stéréolithographie - Résine photodurcissable), FDM standard (fusion (extrusion) de fils plastiques éventuellement chargés) et FDM haute température (PEEK, PEI, PPSU ...) jusqu'à 400 °C.

Compétence rare : à noter, jusqu'à fin mars 2024, l'activité chaudronnerie avec qualification de mode opératoire de soudage (QMOS), un soudeur qualifié, le suivi qualité global d'équipement sous pression de classe IV nécessitant la fourniture d'un dossier constructeur.

## Montage / assemblage / métrologie

Le SERM assure le montage, l'assemblage et les tests d'expériences sur site : montage de tuyauteries, câblage de sondes, vases d'expansion, boîtes à vannes,

moulages de composite ; gestion logistique et transport ; assistance aux expériences sur site.

Moyens spécifiques : salle dédiée au montage mécanique, salle de nettoyage, salle de métrologie, salle « vide » et salle de drapage composite.

## Formations

Le SERM organise des formations au laboratoire, dans des domaines liés à la CAO et gestion de données techniques (GDT) associée, à la FAO, au calcul, ainsi que dans le domaine du vide (détection de fuites) :

- Support national / réseau IN2P3 IAO-CAO / 3D EXPERIENCE qui a piloté le remplacement des logiciels CAO et GDT à l'IN2P3, et ateliers de formation au logiciel CATIA V6 ;
- Animation et coordination nationale IN2P3 du réseau calcul mécanique et multiphysique

IN2P3 (RC2M) et support IN2P3 pour le logiciel ANSYS ;

- Définition du programme et mise en place de l'école de calcul de l'IN2P3 (2022-analyse dynamique) ;
- Encadrement de stages niveaux Lycée, DUT, BTS, écoles d'ingénieurs et Masters.

## Activités de R&D et/ou Valorisation

Les activités de recherche et développement du SERM sont essentiellement liées à des projets du laboratoire. Elles se déclinent selon 5 thématiques, en partenariat étroit avec plusieurs organismes (CEA, CERN, ILL...) :

- R&D Matériaux (sels fondus et composites) :
  - Etude du changement de phase et des échanges thermiques en paroi des sels fondus à haute température, avec la responsabilité technique de la Plateforme FEST.
  - Structures composites ultralégères pour détecteurs (ALICE ITS et ATLAS ITK) en UD ou tissus carbone et résines époxy ou cyanate-ester (bag molding) et pièces structurelles de haute résistance (thermocompression).
- Intégration systèmes (mécatronique-automatisme) : projets SWATH et LSST.
- Usinage de profils anti-reflet sur lentilles silicium : projet CONCERTO.
- Support national / réseau CNRS Fabrication Additive (RFA).
- Le LPSC est dorénavant associé au LEGI, au CPPM et au LPNHE au sein d'un projet de R&T IN2P3 (budget de 100 k€) sur une période de 3 ans (2023-2025) après la relocalisation en août 2024 du projet micro-canaux du LAPP vers le LPSC et en particulier du banc de mesure CO<sup>2</sup> utilisé pour les tests d'échangeurs pour le refroidissement des capteurs pixel de nouvelle génération.

**POUR EN SAVOIR +**

### Ressource Web

- Page web du service mécanique du LPSC : [https://lpsc.in2p3.fr/?page\\_id=309](https://lpsc.in2p3.fr/?page_id=309)

# SERVICE INFORMATIQUE

## Membres permanents

Guillaume Dargaud, William Del Net, Thierry Descombes, Jérôme Fulachier, Christine Gondrand, Younes Khorchach, Fabian Lambert (chef de service adjoint), Frédéric Melot (chef de service), Pascal Meyrand, Laurent Neiger (chef de service adjoint), Jérôme Odier, Joseph Piarulli.

## Membres non permanents

Nora Achbak (CDD), Gaël Alguero (CDD), Antoine Bernard (CDD), Maxime Jaume (apprenti), Anthony Perbet (apprenti).

Le service informatique est composé d'une dizaine d'agents sur la période 2022-2024. Il s'organise en deux pôles : administration systèmes et réseaux, et développements logiciel. Il répond aux besoins d'environ 230 utilisateurs au LPSC et fournit des solutions logicielles au bénéfice de collaborations nationales et internationales. Durant cette période, le service informatique a réorganisé son activité d'administration systèmes et réseaux afin d'anticiper le départ à la retraite de tous ses agents présents depuis plus de 20 ans.

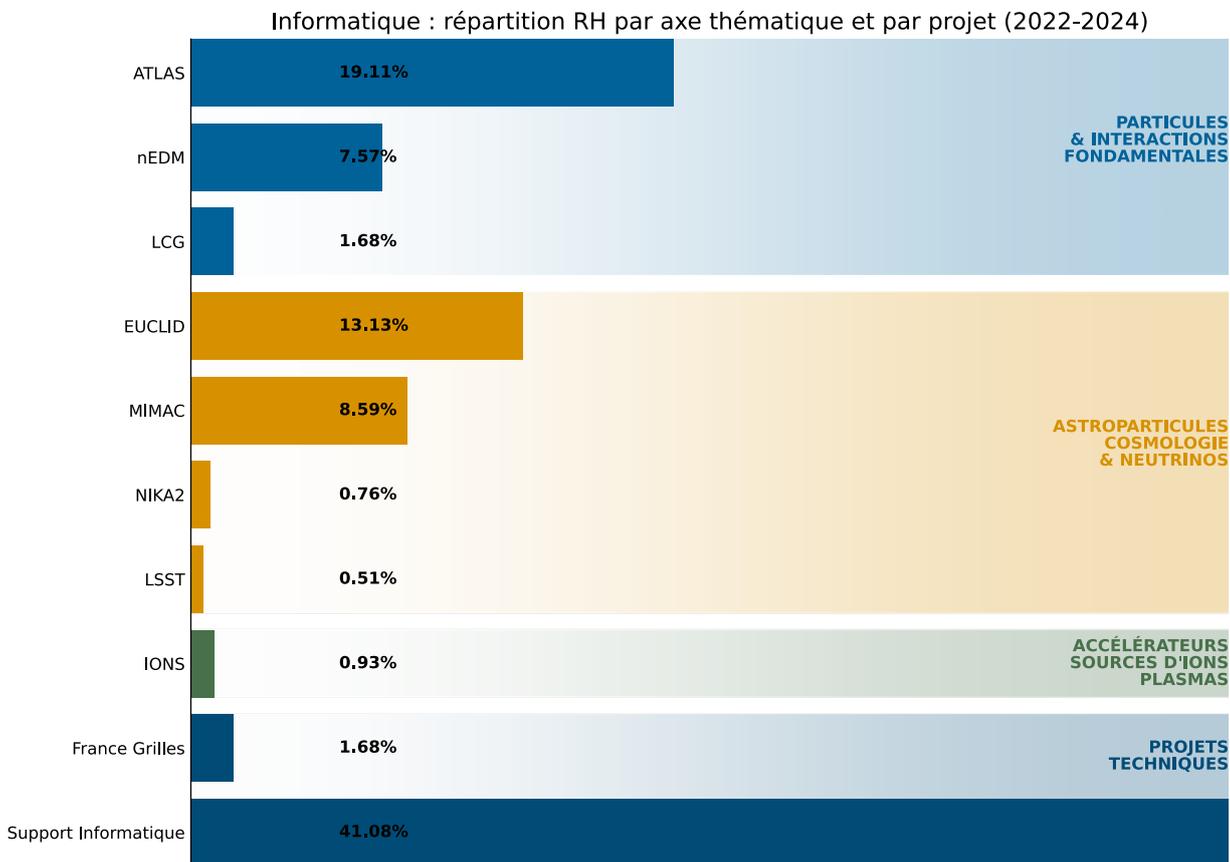
## Missions et organisation

Le service informatique a deux missions principales, gérées par deux équipes.

**Le pôle "Administration Systèmes et Réseaux"**, est garant de l'exploitation des infrastructures informatiques du laboratoire : réseaux, serveurs de données, serveurs de calcul, et jusqu'en janvier 2023 d'un nœud Tier-2 de la grille de calcul et de stockage WLCG (World Wide Large Hadron Collider Computing Grid).

**Le pôle "Développement Logiciel"** a pour mission la conception, le développement et l'exploitation de systèmes informatisés au bénéfice des expériences de physique des hautes énergies et des utilisateurs du laboratoire.

# Implications sur les projets scientifiques et techniques



## Focus et sélection de faits marquants durant la période 2022-2024

### Écosystème AMI ATLAS Metadata Interface

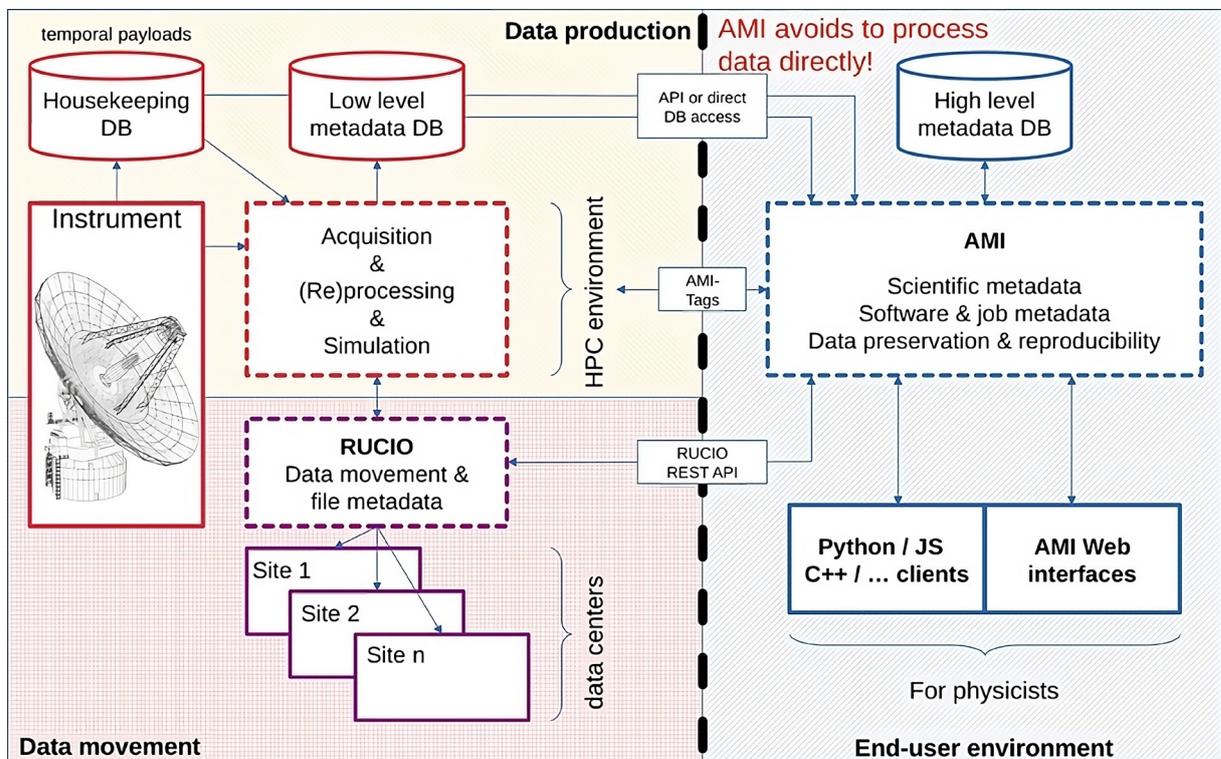
Un effort significatif a été réalisé pour finaliser et valoriser la nouvelle version de l'écosystème AMI (<https://ami-ecosystem.in2p3.fr>), désormais entièrement opérationnelle pour la gestion des métadonnées scientifiques. Ce travail inclut des demandes de licences open source, une documentation enrichie, ainsi qu'une «dockerisation» complète des différents composants pour en simplifier le déploiement. En outre, une démonstration en ligne est accessible pour permettre aux

utilisateurs de découvrir les fonctionnalités du système : <http://demo.ami-ecosystem.in2p3.fr:667/>

L'écosystème AMI comprend plusieurs modules logiciels qui permettent la sélection de données scientifiques selon divers critères, ainsi que l'agrégation et la visualisation des métadonnées à chaque étape de la chaîne de production. La figure ci-dessous illustre les nombreuses fonctionnalités d'AMI, incluant la gestion des catalogues de métadonnées, la gestion des serveurs de tâches, la gestion des utilisateurs, et des outils de monitoring.

En lien avec la collaboration ATLAS du CERN, une refonte de la base de données de production des métadonnées scientifiques est en cours, renforçant davantage l'infrastructure de gestion des données. Ce travail a fait l'objet de présentations lors de deux conférences CHEP récentes. Lors de la conférence CHEP 2023 (<https://www.jlab.org/conference/CHEP2023>), deux posters ont été présentés, accompagnés de deux publications. Lors de CHEP 2024 (<https://indico.cern.ch/event/1338689>), une présentation orale et un poster ont été présentés, avec deux publications à venir dans le journal EPJ Web of Conferences.

En plus de son utilisation au sein de la collaboration ATLAS depuis plus de 20 ans, AMI a été adopté par plusieurs autres projets scientifiques. Parmi ceux-ci : le projet NIKA2 (avec un site dédié utilisant AMI v2 pour la gestion des métadonnées d'observation d'amas de galaxies), les expériences nEDM et n2EDM (utilisant AMI v2 pour créer des interfaces de monitoring en temps réel pour les données d'acquisition), ainsi que des collaborations avec l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG) pour des missions spatiales (telles que Rosetta et Philae) et des applications de gestion dématérialisées pour le LPSC.



(Crédit : Jérôme Odier, LPSC, CNRS).

L'écosystème AMI s'intègre dans les «workflows» de traitement de données et métadonnées scientifiques.

### Projet Euclid

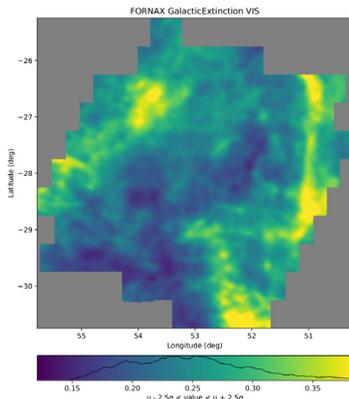
Le service informatique est responsable de LE3 VMPZ-ID, un sous-système clef du logiciel d'analyse d'Euclid (satellite lancé en juillet 2023). Il génère une centaine de cartes photométriques représentant les propriétés du relevé astronomique, de l'instrument ainsi que du ciel (les systématiques), et qui influencent la détection des galaxies.

En exploitant des outils de machine learning sur CPU

et GPU, il reconstruit aussi la fonction de transfert du télescope pour corriger les études de clustering de galaxies de l'impact des systématiques.

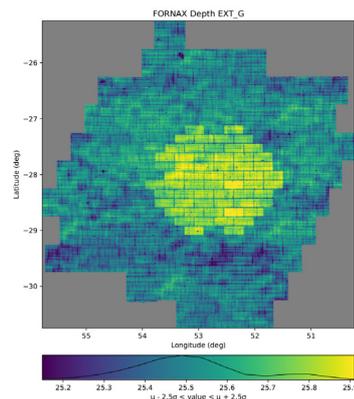
Récemment, LE3 VMPZ-ID a été chargé de produire des catalogues réduits de galaxies pour les différents groupes de travail de la collaboration.

LE3 VMPZ-ID est en production depuis 2023 et joue un rôle fort dans le pipeline d'analyse d'Euclid.



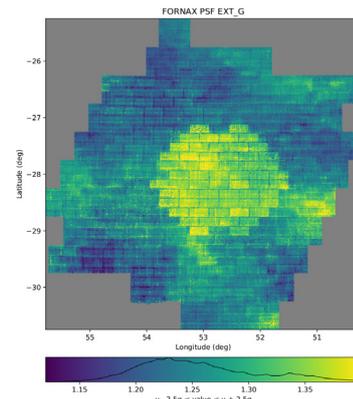
(Crédits : Gaël Aguero et Jérôme Odier, LPSC, CNRS, avec les données publiques du télescope spatial Planck).

Extinction causée par la poussière galactique telle que perçue par l'instrument VIS.



(Crédits : Gaël Aguero et Jérôme Odier, LPSC, CNRS, avec les données du télescope terrestre Subaru).

Limite de magnitude pour la bande «g».



(Crédits : Gaël Aguero et Jérôme Odier, LPSC, CNRS, avec les données du télescope terrestre Subaru).

Fonction d'étalement du point pour la bande «g».

## Projet Rubin LSST

Le service informatique participe au projet international Legacy Survey of Space and Time (LSST) de l'Observatoire Vera C. Rubin, dont l'objectif est d'établir une carte de l'univers et de cataloguer des milliards de galaxies. Le service travaille à optimiser la chaîne de traitements d'images, en termes de temps d'exécution, de consommation mémoire ou électrique.

Pour identifier les sections de code à cibler, des logiciels spécialisés dans le profilage de code sont utilisés, auxquels une plus-value d'optimisation est apportée. Plusieurs stratégies sont possibles selon les contraintes logicielles :

- implémentation d'algorithmes plus efficaces,
- réécriture dans un langage bas niveau plus rapide,
- réécriture en réutilisant des instructions SIMD, ...

Ce travail est effectué en collaboration avec d'autres structures de l'IN2P3, dont le CC-IN2P3, qui aura la charge du traitement de 40 % des images brutes.

Le service informatique a également participé à la mise en fonction de la caméra de LSST avec des contributions logiciels sur le pilotage de bancs d'étalonnage optique avancés qui ont été utilisés de manière intensive ces 3 dernières années.

## Autres participations à des projets de développement logiciel

- Gestion du système de contrôle et d'acquisition de la sonde plasma QueDoV2, qui est depuis utilisée de façon intensive y compris par d'autres laboratoires.
- Customisation d'AMI (développement d'outils de visualisation pour les données expérimentales) et gestion d'une librairie de traitement de données afin d'effectuer la visualisation des données de l'expérience n2EDM avec un délai de quelques minutes.
- De nouvelles applications de dématérialisation de formulaires ont été développées localement et mises en production :
  - o Prolongations de stage,
  - o Interfaces d'administration des formulaires,
  - o Signature électronique des chartes informatiques,
  - o Propositions de stages
  - o Contacts en cas d'urgence.

De plus une application de demandes d'achats dématérialisée est en cours de développement.

## Arrêt du site de grille

En 2022, le LPSC a pris la décision de décommissionner le Tier2 (site de Grille de calcul et de stockage pour les expériences LHC). Avant son arrêt en janvier 2023, il possédait une capacité de 25 000 HEP-SPEC06 (soit la capacité d'utiliser plus de 2000 processus en parallèle) et une capacité de stockage de 1,6 Po net.

Depuis, une partie des serveurs de stockage (environ 1Po) a été réinstallée et reconfigurée pour faire du stockage CEPH pour le laboratoire. CEPH est une plateforme libre de stockage distribué. Les principaux objectifs de CEPH sont d'être un stockage complètement distribué sans point unique de défaillance, extensible jusqu'à l'exaoctet et librement disponible. Les données sont répliquées, permettant au système d'être tolérant aux pannes.

La majeure partie des machines de calcul du Tier2 ont été réinstallées et reconfigurées afin de mettre à jour notre ferme de calcul pour le laboratoire.

### **Améliorations des services proposés et de la sécurité informatique pour le site de Modane**

En 2023 l'installation d'un serveur officiant comme passerelle d'entrée unique sécurisée par SSH a permis de remplacer les anciens services VPN obsolètes.

Cette passerelle a évolué en accueillant en 2024 une interface de gestion des accès collaborateurs aux expérimentations menées au laboratoire. En effet, un système complet permet désormais aux collaborateurs extérieurs de demander un accès personnalisé et sécurisé aux serveurs sur lesquels ils doivent se connecter. Il appartient au personnel du site de Modane de valider ou refuser ces demandes et au service informatique d'effectuer les opérations nécessaires.

Toute l'infrastructure réseau a été renouvelée sur le site hors tunnel.

### **Mise en place d'un système de gestion des logs informatiques**

La législation impose que les logs des serveurs soient conservés durant un an, et que l'on puisse les produire en cas de demande. Il est ainsi nécessaire de les sécuriser hors des serveurs eux-mêmes afin de garantir leur

intégrité en cas de compromission.

A cet effet, une solution d'export des logs de l'ensemble de nos serveurs vers une plateforme centralisée a été mise en place, qui les conserve de manière sécurisée sur une année glissante.

Une solution d'analyse et de recherche dans ces fichiers a également été développée afin de pouvoir en extraire plus rapidement et efficacement les éléments permettant d'assurer le support quotidien de l'exploitation des différents services offerts.

### **Diverses améliorations dans notre système d'informations**

- Changement de version majeure de la solution antivirus F-Secure vers WithSecure, installé sur l'ensemble des postes de travail du laboratoire (environ 500 machines).
- Installation du logiciel Jamf, solution de gestion et de configuration des appareils Apple du laboratoire.
- Installation en 2024 du logiciel de batch HTCondor sur la ferme de calcul.
- Mise en place d'un nouvel outil de monitoring du réseau et des serveurs Zabbix avec des alertes par mail, en remplacement de Centreon.
- Remplacement du système de gestion des tickets et constitution d'une base de connaissances de suivi des demandes utilisateurs.
- Participation au groupe de travail régional « Plan de Reprise d'Activité post-cyberattaque » dans le cadre du réseau SARI (<https://sari.cnrs.fr>).
- Enrichissement et mises à jour de l'ensemble des documentations.

## **Compétences et moyens matériels**

Outre des compétences en systèmes et réseau (climatisation d'une salle informatique en "free-cooling", solution de déploiement, mise à disposition de ressources importantes de calcul et de stockage ...) ainsi que la maîtrise de différentes techniques en développement d'applications (C, C++, Java, Python, PHP, SQL, JavaScript, bases de données, interfaces

homme-machine, contrôle de version, outil d'intégration...), le service informatique a progressivement développé une expertise en traitement de métadonnées scientifiques dans le domaine de la physique des hautes énergies, et s'est ouvert ces dernières années au calcul scientifique et au machine learning.

# SERVICE PATRIMOINE ET INFRASTRUCTURES

## Membres permanents

Thierry Cabanel, Nicolas Rico, Samuel Roni, Christophe Bernard (chef de service).

**Le service joue un rôle central dans la gestion, la maintenance et l'adaptation des bâtiments ainsi que des équipements techniques associés. Il assure la maîtrise d'œuvre pour les travaux nécessaires, réalise des études, et organise les aménagements ou modifications des locaux afin de répondre aux besoins des activités scientifiques et des différents services.**

## Missions et organisation

Son rôle inclut la maintenance régulière du patrimoine bâti, la planification de rénovations et la mise aux normes des infrastructures, parfois sur plusieurs années. En garantissant sécurité, confort et performance énergétique, le service soutient activement le bon fonctionnement du laboratoire et le développement de nouvelles expériences, tout en respectant les normes en vigueur.

Le service est constitué fin 2024 de 3 personnes pour entretenir un site composé de 10 bâtiments construits

fin des années 60 représentant environ 20 000 m<sup>2</sup> de bureaux et d'aires d'expérience sur 5 hectares d'emprise au sol. Les infrastructures sont composées d'un autocommutateur téléphonique gérant près de 400 lignes, d'un contrôle d'accès, de 4 réseaux d'eau, 3 postes de transformations 20 kV, 2 compresseurs alimentant près de 2 km de réseau d'air comprimé, 25 climatisations ou ventilo convecteurs, 2 sous-stations de chauffage urbain, 8 ponts roulants, 2 ascenseurs, 6 salles blanches, 1 amphithéâtre de 200 places, d'une cafétéria, d'espaces de stockage...

Ces bâtiments et infrastructures nécessitent une attention particulière et un entretien permanent. Des travaux sont constamment réalisés pour répondre aux besoins des services, des groupes et des expériences.

## Faits marquants

Entre 2022 et 2024, l'Université Grenoble Alpes et le Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie ont mené une série de projets d'envergure visant à améliorer les infrastructures, réduire la consommation énergétique, et répondre aux besoins croissants en espaces de travail.

### Transition vers le chauffage urbain et installation de la Gestion Technique Centralisée

En 2022, l'UGA et le LPSC ont entrepris une transition vers le chauffage urbain pour réduire la dépendance aux énergies fossiles. Ce projet impliquait le remplacement de la chaufferie au gaz par un raccordement au réseau de chauffage urbain de la Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise (CCIAG). Dans ce cadre, une Gestion Technique Centralisée (GTC) a été installée, permettant le suivi et l'optimisation en temps réel des installations de chauffage, contribuant

ainsi à maximiser les gains d'efficacité tout en réduisant les consommations superflues. Ce projet a mobilisé un investissement de 400 000 € de l'UGA pour les travaux du réseau secondaire, tandis que la CCIAG a pris en charge la réalisation de la partie primaire.

En 2023 et 2024, le LPSC a décidé de compléter ce projet en remplaçant tous les robinets thermostatiques des bâtiments 1, 2 et du Hall B, afin d'améliorer la régulation thermique.



(Crédit : Christophe Bernard, LPSC).

Sous-station de chauffage urbain primaire et secondaire au bâtiment 7.

## Modernisation des infrastructures et développement des capacités de calcul

En 2023, l'UGA, en collaboration avec le LPSC, a lancé deux projets majeurs pour moderniser les infrastructures et répondre aux besoins en puissance de calcul de l'université de Grenoble.

### 1. Rénovation du bâtiment 9

Pilotée par la Direction Exploitation Maintenance de l'UGA, la rénovation du bâtiment 9 comprenait un désamiantage complet et la modernisation des espaces de travail. Les travaux ont eu lieu de juin à septembre 2024 et incluaient :

- Le désamiantage des sols pour éliminer tout risque d'exposition.
- La réorganisation des espaces intérieurs pour une meilleure circulation.
- Une rénovation intégrale, avec réfection des peintures, pose de faux plafonds, isolation acoustique et thermique, remplacement des cloisons, portes, sols, et installation de VMC double flux pour améliorer la qualité de l'air.
- Le remplacement de certaines huisseries par du double vitrage pour renforcer l'isolation thermique.
- La création d'une salle de réunion supplémentaire et d'une salle de convivialité pour favoriser les échanges et le bien-être des utilisateurs.
- La pose de nouveaux radiateurs et robinets thermostatiques sur tous les émetteurs.
- La mise en service de la téléphonie sans fil numérique DECT pour tous les utilisateurs de ce bâtiment.

### 2. Implantation d'un container de calcul haute performance «Kraken» au LPSC

Afin de répondre aux besoins en simulation, analyse de données et calcul intensif, l'UGA a décidé d'implanter sur la presqu'île scientifique un container de calcul haute performance d'une puissance consommée de 300 kW, nommé «Kraken». Cette infrastructure renforcera les capacités de calcul de l'université, au service de la recherche. Le projet est actuellement en cours de fabrication, et les travaux d'installation sur les terrains du LPSC viennent de commencer.



(Crédit : Christophe Bernard, LPSC).

Couloir desservant les nouveaux bureaux et la salle de convivialité du bâtiment 9.

## Autres projets et travaux réalisés entre 2020 et 2024

Outre ces grands projets, le LPSC a entrepris de nombreuses améliorations pour moderniser et sécuriser ses infrastructures :

- Modernisation des accès : remplacement des portes d'accès aux halls d'expérience par des portes sectionnelles motorisées (bâtiment 6 et Hall Ariane) et installation de portes vitrées entre le bâtiment 1 et le Hall B.
- Transformation du Hall Ariane : adaptation pour accueillir l'atelier d'assemblage des CRP Dune, avec l'installation d'un tank d'azote de 27000 litres.
- Installation d'un nouveau poste de garde : mise en service des deux portails sur l'avenue des Martyrs pour renforcer la sécurité.
- Climatisation : remplacement ou installation de systèmes de climatisation dans plusieurs halls d'expérience.
- Entretien des espaces verts : mise en place du nouveau contrat d'entretien incluant une gestion plus respectueuse de la biodiversité et des opérations d'élagage conséquentes.
- Création d'un local de radioprotection extérieur et aménagement d'un sas pour le local serveur.
- Amélioration des infrastructures pour vélos et motos : installation d'un nouveau garage à vélos et modification des abris existants pour faciliter leur accès.
- Rénovation des bureaux et espaces de travail : réfection complète ou partielle d'une trentaine de bureaux, ateliers, halls d'expérience, couloirs et escaliers, incluant la pose de faux plafonds, réfection des peintures, changement des sols, installation d'éclairage LED, travaux électriques et mise aux normes.



(Crédit : Christophe Bernard, LPSC).

Porte sectionnelle motorisée et tank d'azote pour l'expérience Dune dans le Hall Ariane.

# SERVICE SÉCURITÉ ET RADIOPROTECTION

## Membre permanent

William Regairaz,  
Assistant de Prévention (AP), Personne Compétente en Radioprotection (PCR) du laboratoire,  
et gestionnaire des matières nucléaires.

## Missions et organisation

Sous la responsabilité du directeur, ce service met en place la gestion de la sécurité des personnes dans le laboratoire. Il s'agit de la sécurité des personnes liée aux activités scientifiques et aux infrastructures du laboratoire par la prévention des risques (électriques, asphyxie, chimiques, laser, machines-outils, incendie etc.), s'appuyant sur la mise en œuvre de dispositions techniques, humaines ou organisationnelles, avec le concours de tous.

Concernant la radioprotection et la gestion des matières nucléaires, les activités du service couvrent la dosimétrie, des études, mesures, contrôles, gestion des sources radioactives (autorisations de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), achat, prêt, transport, évacuation etc.), sécurité auprès des accélérateurs, et pour les matières nucléaires, la comptabilité, des réponses aux évolutions de la réglementation, la sécurisation physique, la déclaration de certaines collaborations etc.

Avec le concours du directeur, des chefs de services et d'équipes, est produit annuellement le document d'évaluation des risques, qui définit des actions d'amélioration à mener pour la diminution des risques résiduels. Celles-ci concernent également les conditions de travail.

Le service sécurité évalue les besoins en formations à la sécurité des personnels, notamment lors de leur arrivée, et en assure certaines.

Il établit les plans de prévention avec les entreprises extérieures ou collaborateurs, et les laboratoires accueillant des agents du LPSC, formalisant ainsi les dispositions de sécurité retenues avec eux pour diminuer au maximum les risques identifiés.

La gestion des situations d'urgence (secourisme, incendie) et de crise (risque nucléaire, COVID etc.) est également prise en charge par le service.

Pour ce qui concerne les projets scientifiques et techniques, des analyses de risques sont effectuées pour tous les projets ayant lieu au LPSC et susceptibles de comporter des risques, en amont et en continu.

D'autre part, toutes les activités techniques font l'objet d'évaluations.





# RAPPORT D'ACTIVITÉ

2022 - 2024

## COMITÉ ÉDITORIAL

Johan BREGEON (Coordinateur)  
Sébastien CHABOD  
Florent COLLOVATI  
Laurent DEROME  
Julien FAIVRE  
Yolanda GOMEZ MARTINEZ  
Fabienne LEDROIT-GUILLON  
Johann MENU  
Johana PAQUIEN  
Alain RETAILLEAU  
Christophe VESCOVI

## COMITÉ DE RÉDACTION

Maud BAYLAC  
Corinne BERAT  
Christophe BERNARD  
Alexandre BES  
Olivier BOURRION  
Annick BILLEBAUD  
Andrea CATALANO  
Benjamin CHEYMOL  
Benoît CLEMENT  
Audrey COLAS  
Denis DAUVERGNE  
Jean-Baptiste DE REGIE DE VIVIE  
Laurent DEROME  
Cyrille DOUX  
Marie-Laure GALLIN-MARTEL  
Véronique GHETTA  
Julien GIRAUD  
Christine GONDRAND  
Denis GRONDIN  
Rachid GUERNANE  
Murielle HEUSCH  
Ana LACOSTE  
Fabian LAMBERT  
Fabienne LEDROIT-GUILLON  
David MAURIN  
Frédéric MAYET  
Frédéric MELOT  
Olivier MEPLAN  
Elsa MERLE  
Jean-François MURAZ  
Christophe PEAUCELLE  
Guillaume PIGNOL  
Jérémy QUEVILLON  
William REGAIRAZ  
Alain RETAILLEAU  
Daniel SANTOS  
Anne STUTZ  
Emmanuelle VERNAY  
Christophe VESCOVI

Imprimé sur papier certifié FSC®.







Laboratoire  
de Physique Subatomique  
et de Cosmologie

site web : <https://lpsc.in2p3.fr>

Site de Grenoble :

53, avenue des Martyrs  
38026 Grenoble Cédex  
contact : +33 4 76 28 40 00

Site de Modane (LSM) :

Carré Sciences  
1125 route de Bardonnèche  
73500 Modane  
contact : +33 4 79 05 22 57

