

LABORATOIRE DE PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET DE COSMOLOGIE

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2 0 1 9 - 2 0 2 1



LABORATOIRE DE PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET DE COSMOLOGIE

RAPPORT D'ACTIVITÉ

2 0 1 9 - 2 0 2 1



SOMMAIRE

PARTICULES ET INTERACTIONS FONDAMENTALES	6
Équipe Alice	9
Équipe Atlas	15
Équipe de physique théorique	22
Équipe neutrons ultrafroids (UCN)	28
ASTROPARTICULES, COSMOLOGIE & PHYSIQUE DES NEUTRINOS	34
Équipe Auger	37
Équipe Cosmologie multi-longueurs d'onde	41
Équipe DARK	46
Équipe Matière Noire (MIMAC)	54
Équipe Neutrino	57
PHYSIQUE POUR L'ÉNERGIE ET LA SANTÉ	64
Équipe Molten Salt Fast Reactor MSFR	67
Équipe Physique des réacteurs	71
Équipe Physique nucléaire et applications médicales	79
Neutrons pour la science et la société (projet transverse)	88
ACCÉLÉRATEURS, SOURCES D'IONS ET PLASMAS	92
Pôle accélérateurs et sources d'ions	95
Équipe Plasmas, Matériaux, Nanostructures	103
LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MODANE	108
La plateforme nationale LSM	111
PLATEFORMES ET INSTALLATIONS TECHNIQUES	116
La plateforme neutronique GENESIS	119
Plateforme FEST	121
Plateforme des Procédés Plasma Avancés	123
Laboratoire de mesures de Basse Activité	125
Salle de Cosmologie Expérimentale	127
Grille de calcul (Tier-2)	129
ENSEIGNEMENT ET FORMATION PAR LA RECHERCHE	132
Les formations Master et Ingénieur	135
COMMUNICATION ET DIFFUSION DES CONNAISSANCES	140
Communication	143
Faits marquants 2019-2021	145
SOUTIEN AUX ACTIVITÉS DE RECHERCHE	148
Service Administratif et Financier	151
Service Communication & Documentation	154
Service Détecteurs et Instrumentation	155
Service Électronique	161
Service Études et Réalisations Mécaniques	164
Service Informatique	171
Service Patrimoine et Infrastructures	176
Service Sécurité et Radioprotection	179

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 (GINP). 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 en recherche fondamentale dans le domaine de la physique subatomique et de la cosmologie et en 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 et 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, 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 technique engagé sur les développements d'autres accélérateurs et de sources. 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 forte visibilité. En 2019, le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) est devenu une plateforme nationale du LPSC.

Le LPSC est structuré en 14 équipes de recherche réparties en quatre axes : "Particules et interactions fondamentales", "Astroparticules, Cosmologie & Physique des neutrinos", "Énergie et Santé", "Accélérateurs, Sources d'ions et Plasma", et en dix services dont six services techniques : "Accélérateurs et Sources d'ions", "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 2019 jusqu'à début 2022.

En recherche fondamentale, cette période est marquée par le démarrage de nouveaux projets qui nous engagent pour les années à venir, en particulier en cosmologie observationnelle (CMB-S4, LiteBIRD), et par la concrétisation de l'engagement du laboratoire à travers des contributions techniques importantes dans les expériences auprès du LHC (ATLAS-ITk) et de physique des neutrinos (DUNE). Cette période est aussi marquée par de nombreuses contributions à la construction d'instruments (Auger-PRIME, n2EDM, EUCLID, LSST/Rubin, Ricochet) pour lesquels la phase d'exploitation est en préparation. 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, 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 et

MYRRHA. 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. Ces plateformes de recherche peuvent aussi accueillir des acteurs extérieurs (autres laboratoires, partenaires institutionnels ou industriels) et participent à la valorisation des développements techniques réalisés dans le laboratoire.

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. La plateforme de spectrométrie gamma du LSM, dédiée à l'étude des matériaux d'ultra-basse radioactivité et à des mesures pour la biologie ou les géosciences a été reconfigurée grâce au programme PARTAGE. De plus, le LSM participe à l'installation et à la mise en place d'expériences de physique des neutrinos comme SuperNEMO ou CUPID-Mo, et comme le projet DAMIC-M dans le domaine de la recherche de matière noire. Depuis début 2022, le LSM est labellisé Infrastructure de Recherche (IR) ce qui améliore la visibilité de la plateforme et à terme va permettre de renforcer ses capacités pour héberger et participer au développement de nouvelles expériences.

Enfin, le laboratoire est très impliqué dans l'enseignement. La plateforme de travaux pratiques de physique subatomique et nucléaire accueille près de 400 étudiants par an issus de l'université comme de l'école d'ingénieurs, de niveau L3 à M2. Le laboratoire est également impliqué fortement dans la coordination et la direction de plusieurs masters grenoblois, et est l'un des lieux incontournables de l'enseignement de M2 dans les domaines de la physique des particules, nucléaire, astroparticules et cosmologie. Cette ouverture vers les milieux académiques permet d'accueillir plus de 30 doctorants. La mission de formation du laboratoire passe aussi par l'accueil de stagiaires et l'ensemble du laboratoire est mobilisé pour accueillir environ 60 stagiaires par an venant de BTS, IUT, Licence, Master ou écoles d'ingénieurs.

D'un point de vue organisationnel, ces années ont bien sûr été marquées par la crise sanitaire qui a profondément affecté notre travail et pendant laquelle l'ensemble du personnel a été fortement sollicité pour assurer la continuité de notre activité. En parallèle, la mise en place du télétravail a aussi modifié de manière plus durable nos modes de travail et la vie du laboratoire. Ces crises et évolutions changent notre relation au travail et questionnent la séparation entre vie professionnelle et vie personnelle, et le maintien du collectif au sein laboratoire. Pourtant, l'activité d'un laboratoire de recherche comme le nôtre ne peut se développer que dans le cadre d'une dynamique collective où les échanges, les discussions sont les prémisses des projets communs futurs et portent l'avenir du laboratoire. Maintenir cette unité et cette capacité à construire et porter collectivement nos futurs projets est fondamental.

Durant ces années, notre environnement, notamment sur le site de Grenoble a profondément changé avec la mise en place de l'Établissement Public Expérimental UGA regroupant l'ensemble des forces de l'enseignement supérieur public du site Grenoble Alpes. Le LPSC doit être un acteur de premier plan sur le site de l'Université Grenoble Alpes, et participer au rayonnement du site de Grenoble en lui assurant une forte visibilité à travers les projets scientifiques de grande envergure qu'il porte.

Le décès de Cécile Renault en avril 2021 a profondément marqué cette période. Par sa vitalité et le dynamisme qu'elle savait communiquer à tous ceux avec qui elle a pu travailler, ou simplement partager un moment dans le laboratoire, Cécile a toujours occupé une place privilégiée parmi nous. Ce rapport d'activité nous donne l'occasion de revenir sur le rôle important qu'elle a joué au sein de notre communauté, sur ses contributions scientifiques déterminantes dans les projets du laboratoire (Archeops, Planck, LSST/Rubin) et sur son investissement dans de très nombreuses actions menées pour faire connaître et aimer nos disciplines à un large public.



Cécile Renault (1970-2021)

PARTICULES ET INTERACTIONS FONDAMENTALES

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 nEDM, 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 expérimentateurs et les théoriciens dialoguent en permanence, à l'échelle du laboratoire et surtout à l'échelle mondiale. Les premiers fournissent des observations aux seconds, qui les aident dans leur interprétation et s'inspirent de ces résultats pour imaginer de nouvelles particules et de nouvelles interactions.

ÉQUIPE ALICE

Les quarks sont confinés par la force forte à l'intérieur des hadrons, et notamment des protons et des neutrons qui composent le noyau atomique. Toutefois, à des densités d'énergie très élevées, comme celles obtenues lors des collisions d'ions lourds au LHC, une nouvelle phase de la matière est créée dans laquelle les quarks et les gluons ne sont plus confinés à l'intérieur des hadrons. Ce plasma de quarks et de gluons (PQG) aurait rempli l'Univers avant la formation des noyaux atomiques, soit pendant quelques millièmes de seconde après le Big Bang. L'équipe ALICE du LPSC Grenoble étudie les propriétés du PQG à l'aide des sondes dures telles que les photons et les jets qui sont capables d'en résoudre la nature à courte distance.

Équipe de recherche : membres permanents

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

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Carolina Arata (Doctorante), Hadi Hassan (Doctorant), Ritsuya Hosokawa (Doctorant), Takuya Kumaoka (Doctorant), Ran Xu (Doctorant).

Personnels des services techniques

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

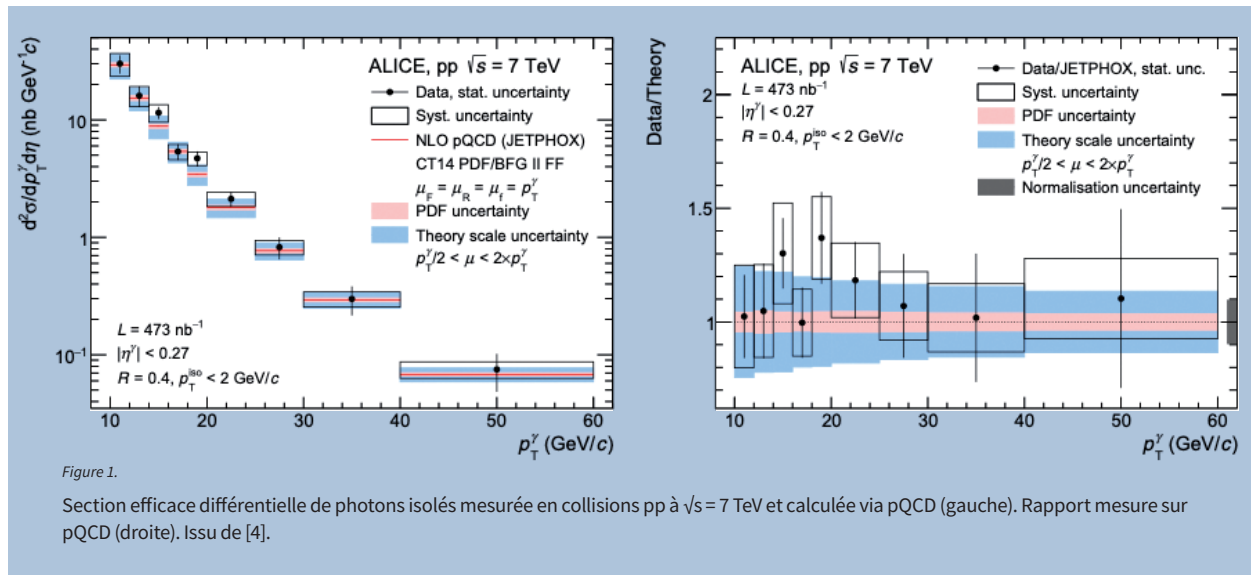
Étude des mésons neutres et des corrélations photon-hadrons

La mesure expérimentale de la section efficace de production de particules et jets de haute impulsion transverse (p_T) dans les collisions hadroniques au LHC est une clé pour contraindre les prédictions de la chromodynamique quantique (QCD) et en particulier les fonctions de distribution des partons (PDF) dans les protons ou noyaux ainsi que les fonctions de fragmentations (FF) des partons en jets de particules. De plus, en collisions Pb–Pb, la perte d'énergie des partons dans le PQG change la section efficace de production des particules et des jets.

Notre groupe s'intéresse à la mesure de la section efficace de production des jets, des mésons neutres π^0 et η et des photons directs de haute impulsion

($p_T > 5-10$ GeV/c), et à leur corrélation avec d'autres hadrons ou jets à l'aide du calorimètre électromagnétique EMCal d'ALICE et des trajectographes centraux d'ALICE (TPC et ITS). Le photon et le jet étant émis dos-à-dos avec une énergie similaire, la mesure de corrélations photon direct-jets ou photon direct-hadrons permet la mesure de la FF du jet grâce à la mesure précise de l'énergie du photon au moment de la production du parton à l'origine du jet.

Dans la période 2019–2020, le groupe a poursuivi son activité de gestion des données fournies par le calorimètre EMCal (calibration, analyse) et a participé à la rédaction d'un article de performance qui sera publié en 2022. Fin 2019, le groupe a également publié l'analyse faite en collaboration avec le groupe ALICE de SUBATECH à Nantes sur la mesure de la section efficace de production des photons isolés (directs) en collisions proton–proton à $\sqrt{s} = 7$ TeV [4] (figure 1). Cette mesure couvre la région $10 < p_T < 60$ GeV/c, c'est-à-dire à plus bas p_T que les autres expériences au LHC à la même énergie de collision ($p_T > 25$ GeV/c), et est en accord avec les calculs perturbatifs de QCD (pQCD).



Une collaboration avec d'autres groupes ALICE a permis la publication de la mesure de corrélation des photons isolés et des hadrons en collisions proton–proton et proton–Plomb à $\sqrt{s}_{NN} = 5.02$ TeV [7]. Cette mesure montre un bon accord avec les calculs de pQCD dans les deux types de collisions et pas de modification de la FF en collisions proton–Plomb par rapport aux collisions proton–proton, donc, ainsi qu'attendu, pas d'indication de présence de PQG en collisions proton–Plomb.

L'habilitation à diriger des recherches de Gustavo Conesa Balbastro [1] soutenue en octobre 2019 est dédiée au travail d'amélioration des performances du calorimètre électromagnétique EMCal, ainsi qu'à l'aboutissement de ce travail par ces mesures.

La période 2020-2021 a été dédiée à ces mesures en collisions proton–proton à $\sqrt{s} = 13$ TeV avec le démarrage de la thèse de Ran Xu fin 2020. Cette thèse porte sur la mesure de la section efficace de production de

photons isolés. La publication des résultats, dont certains éléments préliminaires ont déjà été montrés en conférence, est attendue pour 2023.

Parallèlement, ces activités ont été étendues aux collisions Pb–Pb à $\sqrt{s}_{NN} = 5.02$ TeV. Ces dernières sont divisées en différentes classes de centralité (reliée au

paramètre d'impact de la collision). Le travail actuel consiste à effectuer les mesures des sections efficaces de production de photons isolés ainsi que des corrélations photon isolé–hadrons, thématique de la thèse de Carolina Arata démarrée en 2021.

Étude de la production inclusive de jets

Mesure de la section efficace de production inclusive en collisions pp

Notre équipe a publié les mesures de la production inclusive de jets chargés en collisions pp à $\sqrt{s} = 5.02$ TeV [6] et $\sqrt{s} = 13$ TeV [7] (figure 2). Ces mesures, qui ont fait l'objet de la thèse de R. Hosokawa soutenue en 2019 [2], constituent une étude de QCD en tant que telle dans la région des basses impulsions transverses pour laquelle le détecteur ALICE a été optimisé,

permettant ainsi de sonder les effets non-perturbatifs encore mal connus tels que l'hadronisation et l'événement sous-jacent. Ces mesures servent également à améliorer les contraintes sur la densité de gluons dans le proton ainsi que la compréhension de la structure des jets. La précision obtenue sur les sections efficaces mesurées a permis de mettre au défi les prédictions des calculs pQCD à l'ordre NLO (générateur d'événements Monte Carlo POWHEG du type NLO + PS qui ajoutent la machinerie du développement de gerbes partoniques aux calculs à l'ordre NLO). Nous travaillons actuellement, en collaboration avec le groupe Théorie du LPSC, à la comparaison de nos mesures avec les calculs pQCD à l'ordre NNLO qui devraient réduire sensiblement l'erreur théorique à basse impulsion transverse due à l'échelle de renormalisation.

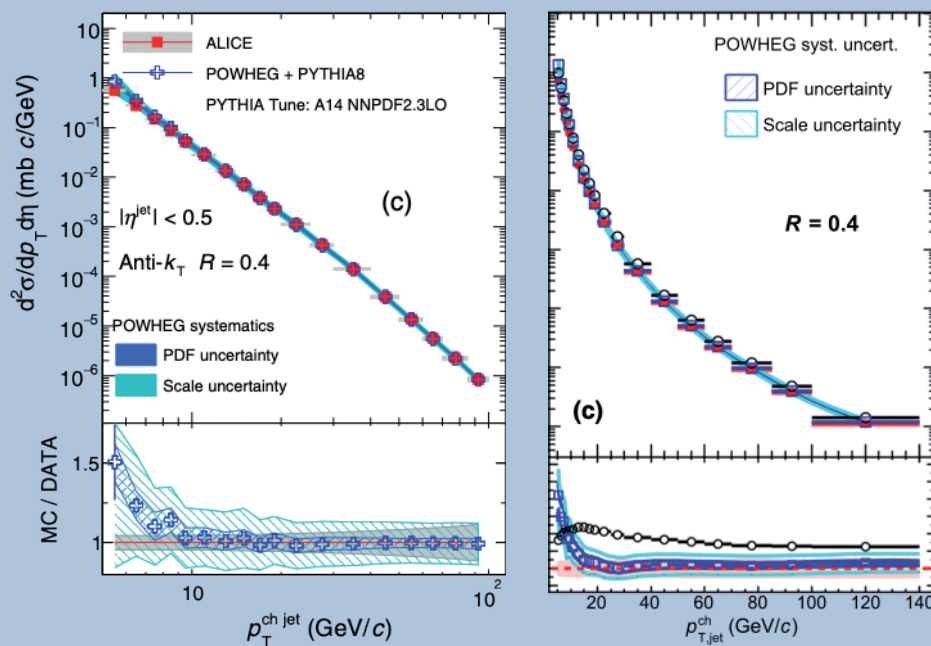


Figure 2.

Section efficace inclusive de jets de rayon $R = 0.4$ mesurée en collisions pp à $\sqrt{s} = 5.02$ TeV (gauche) et $\sqrt{s} = 13$ TeV (droite). Issu de [6].

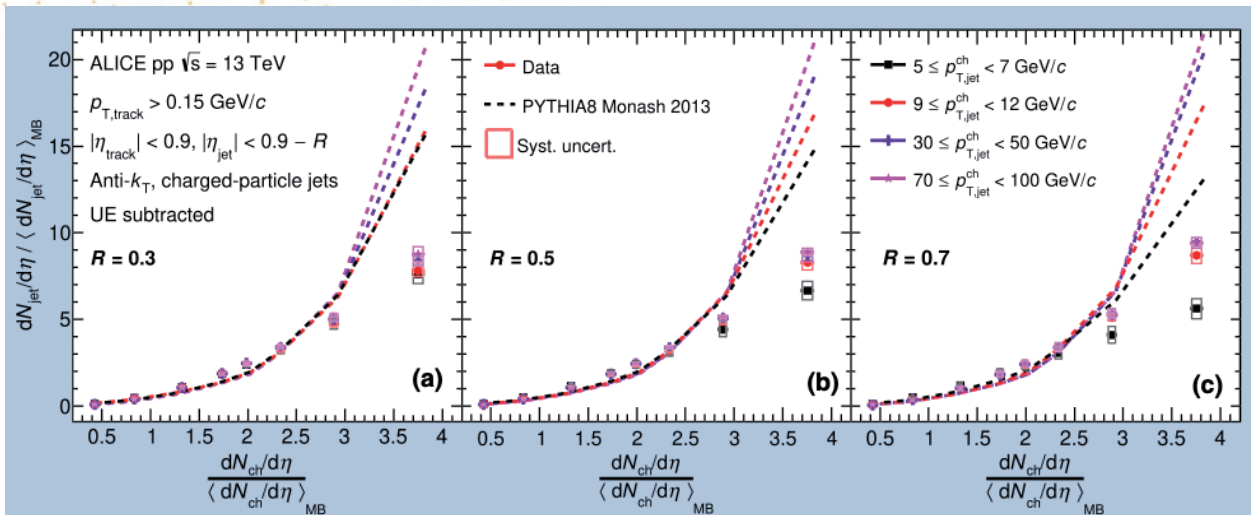


Figure 3.

Mesure de la production de jets en fonction de la multiplicité pour 4 intervalles d'impulsion transverse et rayon de jet. Les prédictions du générateur Monte Carlo PYTHIA8 sont également représentées (issu de [7]).

Mesure de la production de jets en fonction de la multiplicité en collisions pp

Nous avons également étudié la production de jets en fonction de la multiplicité pour des jets de différents rayons [7]. Comme le montre la figure 3, le taux de production de jets augmente avec la multiplicité avec une faible dépendance selon le p_T et le rayon du jet hormis à basse impulsion transverse et pour les plus hautes multiplicités. Ce comportement, dont l'ampleur n'est pas décrite par les générateurs Monte Carlo actuels, a également été observé pour la production de mésons D en collisions p-Pb à $\sqrt{s} = 5.02$ TeV et de J/ψ non-prompts (provenant de la désintégration de mésons B) en collisions pp à $\sqrt{s} = 13$ TeV. Ces mesures ouvrent la voie à une meilleure compréhension de l'interaction entre les mécanismes de production de particules à basse et haute impulsion transverse au sein d'une même collision qui demandera un travail phénoménologique intense.

Mesure de la production de jets de quarks b en collisions pp et p-Pb

Les quarks beaux constituent une sonde de choix pour étudier les propriétés du milieu car, de par leur masse élevée, ils ne peuvent être produits que lors de processus élémentaires à grands transferts d'impulsion aux tous premiers instants de la collision. Ils vont ensuite interagir avec les autres particules du milieu depuis ses prémices, participant aux effets de flot collectif et perdant une fraction significative de leur énergie par rayonnement de gluons. L'étude de la dépendance de ces effets selon la saveur des quarks est une question centrale de la physique des ions lourds au LHC. En vue d'étudier cette dépendance, nous avons travaillé

dans le cadre du travail de thèse de H. Hassan [3], à la mise en œuvre et l'évaluation des performances de techniques d'identification de jets issus de l'hadronisation de quarks beaux par la technique dite de comptage de traces. Cette technique exploite la signature des jets de quarks b qui, de par le long temps de vie des hadrons beaux donnant lieu à un vertex secondaire, contiennent un nombre élevé de traces de grand paramètre d'impact par rapport au vertex primaire.

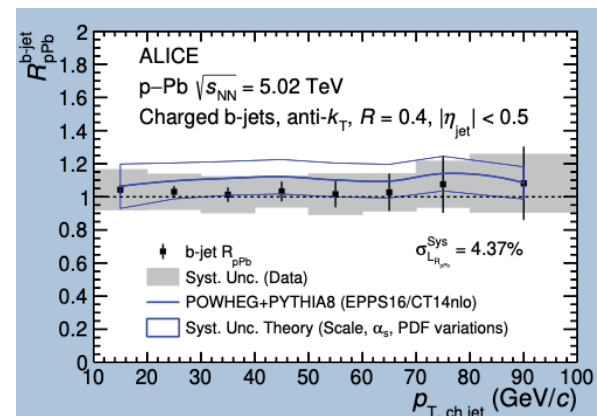


Figure 4.

Mesure du facteur de modification nucléaire de jets de b de rayon $R = 0.4$ en fonction de l'impulsion transverse (issu de [8]).

Nous avons publié [8] une mesure de la section efficace différentielle en impulsion transverse avec une limite inférieure en impulsion transverse encore jamais atteinte au LHC. Cette mesure est correctement décrite par les calculs pQCD à l'ordre NLO du générateur d'événements POWHEG. Un facteur de modification nucléaire compatible avec l'unité a également été mesuré (figure 4), ne suggérant pas la présence de forts effets nucléaires froids.

Jouvence du système de lecture de l'expérience ALICE pour le Run 3 du LHC

La jouvence de l'expérience ALICE au cours du Long Shutdown 2 du LHC doit relever le défi de lire les collisions Pb–Pb au taux d'interaction de 50 kHz, de même que les collisions pp et p–Pb au taux de 200 kHz et plus. Cela se traduira par la collecte et l'inspection d'un volume de données produites en collisions d'ions

lourds environ 100 fois supérieur à celui des Runs 1 et 2. Pour le Run 3, la majorité des sous-détecteurs de l'expérience ALICE ont été mis à niveau pour fonctionner en mode de lecture continue c.-à-d. sans déclenchement. Cette approche est motivée par des rapports signal-sur-bruit attendus très faibles dans la région des basses impulsions transverses, de sorte que le taux de collisions d'intérêt (contenant un candidat signal) sera du même ordre que le taux d'interaction lui-même. Afin d'assurer une lecture continue et de faire face au débit de données qui en résulte, les détecteurs ont été mis à niveau pour pouvoir utiliser les cartes PCIe40 appelées "Common Readout Unit" (CRU) développées par le CPPM. Le service électronique du LPSC Grenoble a eu la responsabilité du développement du micrologiciel CRU commun à tous les sous-détecteurs ^[9].

Étude de la dynamique des gluons nucléaires avec le calorimètre FoCal dans l'expérience ALICE

Des efforts expérimentaux et théoriques considérables sont consacrés depuis de nombreuses années à l'étude de la distribution en impulsion des gluons dans les noyaux. Ces études ont pour but de savoir si la distribution des gluons de faible impulsion peut subir une saturation, constituant un nouvel état de la matière appelé *condensat de verre de couleur*. L'accumulation de preuves expérimentales depuis les premières études menées au RHIC semble indiquer une réduction de la densité de gluons à faible impulsion dans les noyaux lourds, par rapport à celle des protons individuels, aux hautes énergies.

L'instrumentation de la région avant d'ALICE au LHC proposée par le calorimètre FoCal ^[10] permettra de mesurer les densités de gluons à petite fraction d'impulsion du proton ou du noyau, jusqu'à $x \sim 10^{-6}$ avec un faible transfert de quantité de mouvement $Q \sim 4$ GeV/c. Dans ce régime, il est attendu que la

dynamique des gluons soit affectée par une évolution non linéaire de QCD, où les taux de fusion et de division de gluons entrent en compétition, conduisant à la saturation de la densité de gluons. La couverture visée aux angles avant donnera accès à un régime cinématique inexploré où l'effet de la saturation des gluons devrait être d'une ampleur sans précédent.

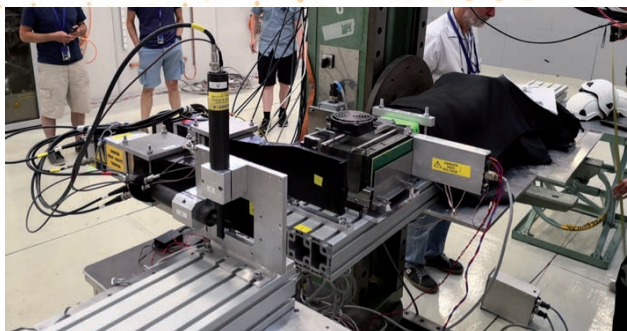


Figure 5.1. (Crédits : Rachid Guernane, LPSC).

À gauche : Démonstrateur du calorimètre électromagnétique de FoCal en prise de données cosmiques dans le hall projet du LPSC.

À droite : vue agrandie du sandwich FEE/Si/W.

FoCal est un calorimètre électromagnétique Si+W de haute granularité combiné à un calorimètre hadronique à échantillonnage conventionnel couvrant la gamme de pseudo-rapacité ($3,4 < \eta < 5,8$). Suite à la publication d'une lettre d'intention, le projet FoCal est, depuis 2019, dans une phase de R&D où le LPSC Grenoble est très actif. Un démonstrateur correspondant à 1/5 d'un module final du calorimètre



électromagnétique FoCal (figure 5) a été construit et assemblé au LPSC Grenoble avec le soutien du Service Détecteurs et Instrumentation. Il a été caractérisé avec des faisceaux délivrés par le PS et SPS du CERN. Les très bons résultats obtenus montrent un signal MIP avec un bon rapport signal sur bruit.

Figure 5.2. (Crédits : Rachid Guernane, LPSC).

Démonstrateur du calorimètre électromagnétique de FoCal sur la voie de faisceau T9 du PS au CERN

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

1. *Study of the strong interaction with high-energy photons at the LHC: Experience with the ALICE-EMCal detector operation and measurements*, Habilitation à diriger des recherches de Gustavo Conesa Balbastro, Université Grenoble Alpes, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02306044>
2. *Measurement of jet properties in pp and Pb-Pb collisions at 5.02 TeV with the ALICE experiment at the LHC*, Thèse de doctorat de Ritsuya Hosokawa (03/2019), Université Grenoble Alpes et Université de Tsukuba, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02447312v1>
3. *Modeling and measurement of the b-jet nuclear modification factor in p-Pb collisions at 5.02 TeV with ALICE at the LHC*, Thèse de doctorat de Hadi Hassan (02/2019), Université Grenoble Alpes et Université Libanaise, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02280803>

Principales publications

4. *Measurement of the inclusive isolated photon production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV*, S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), Eur. Phys. J. C (2019) 79: 896.
5. *Measurement of isolated photon-hadron correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV pp and p-Pb collisions*, S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. C 102 (2020) 044908.
6. *Measurement of charged jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV*, S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), Phys. Rev. D 100, 092004.
7. *Multiplicity dependence of charged-particle jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), Eur. Phys. J. C 82 (2022) 514.
8. *Measurement of inclusive charged-particle b-jet production in pp and p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV*, S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), JHEP 01 (2022) 178.
9. *Versatile firmware for the Common Readout Unit (CRU) of the ALICE experiment at the LHC*, O. Bourrion et al., JINST 16 (2021) 05, P05019.
10. *Letter of Intent: A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment*, S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), CERN-LHCC-2020-009.

Ressources Web

- <https://alice-collaboration.web.cern.ch>

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 de leurs interactions, en utilisant notamment les données produites lors de collisions de protons à une énergie d'environ 13 TeV. 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 de la physique des particules. En outre, elle contribue depuis 2014 aux mises à niveau du trajectographe interne et d'une partie du système de refroidissement du détecteur pour la phase haute luminosité du LHC, qui débutera en 2029.

Équipe de recherche : membres permanents

Johann Collot, Sabine Crépe-Renaudin, Pierre-Antoine Delsart, Marie-Hélène Genest, Marine Kuna, Fabienne Ledroit-Guillon, Annick Lleres, Fairouz Malek, Elisabeth Petit, Jan Stark, Benjamin Trocmé (responsable → 2021), Jean-Baptiste de Vivie (responsable 2022 →).

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Guillaume Albouy (Doctorant), Raphaël Hulsken (Doctorant), Nathan Lalloué (Doctorant), Ana Peixoto (CDD), Dilia Portillo (CDD), Xuan Yang (Doctorant).

Personnels des services techniques

Denis Grondin, Nicolas Emeriaud, Yann Herpin, Yvan Odièvre (Service Études et Réalisations Mécaniques), Ludovic Eraud, Nicolas Ponchant (Service Électronique), Murielle Heusch, Marc Marton, Adeline Richard, Patrick Stassi, Olivier Zimmerman (Service Détecteurs et Instrumentation).

Activités instrumentales

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 de remplacer entièrement le trajectographe actuel, qui ne pourra pas soutenir l'accroissement des doses de rayonnement, par un nouveau détecteur entièrement constitué de capteurs en silicium. Celui-ci devra être installé et testé à temps pour le démarrage du LHC à haute luminosité, prévu en 2029.

Début 2019, il y a deux activités principales : l'intégration des modules de détection sur les supports mécaniques locaux, et la conception des pièces, appelées supports intermédiaires, 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.

Afin de pouvoir démonter un module défectueux après le montage d'un support complet, la communauté OB a développé le concept de cellule, une petite tuile de graphite pyrolytique sur laquelle chaque module sera collé avant d'être vissée sur le support

local. L'équipe du LPSC a longuement testé deux méthodes d'encollage des cellules, par pochoir ou par distributeur automatique (figure 1), avant d'opter pour la seconde. Elle a également contribué au développement de l'outil de pressage du module sur la cellule, élaboré principalement au CPPM (Marseille). En parallèle, elle s'est investie dans la conception d'un banc de tests thermiques et électriques des modules après leur collage sur les cellules.

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 a mûri au cours de ces trois années pour aboutir en 2021 à la version 8, qui ne sera toutefois pas la version finale à cause de l'évolution de l'enveloppe de ce que l'on appelle les services, c'est à dire les différents câbles qui permettent au détecteur de communiquer avec l'extérieur. Des tests thermomécaniques ont été effectués à l'aide d'une boîte froide construite sur mesure (figure 1) et d'une machine à mesurer tridimensionnelle afin de valider le choix des matériaux. Jusqu'à présent, la fabrication des prototypes a été sous-traitée, pour un coup relativement élevé. Afin de maîtriser ces coûts, une méthode de fabrication "maison" a été développée, qui nécessite de dessiner et de fabriquer au LPSC tous les moules et supports, et demande un savoir-faire spécifique pour le drapage du tissu préimprégné, avant le passage en autoclave (qui reste externalisé).

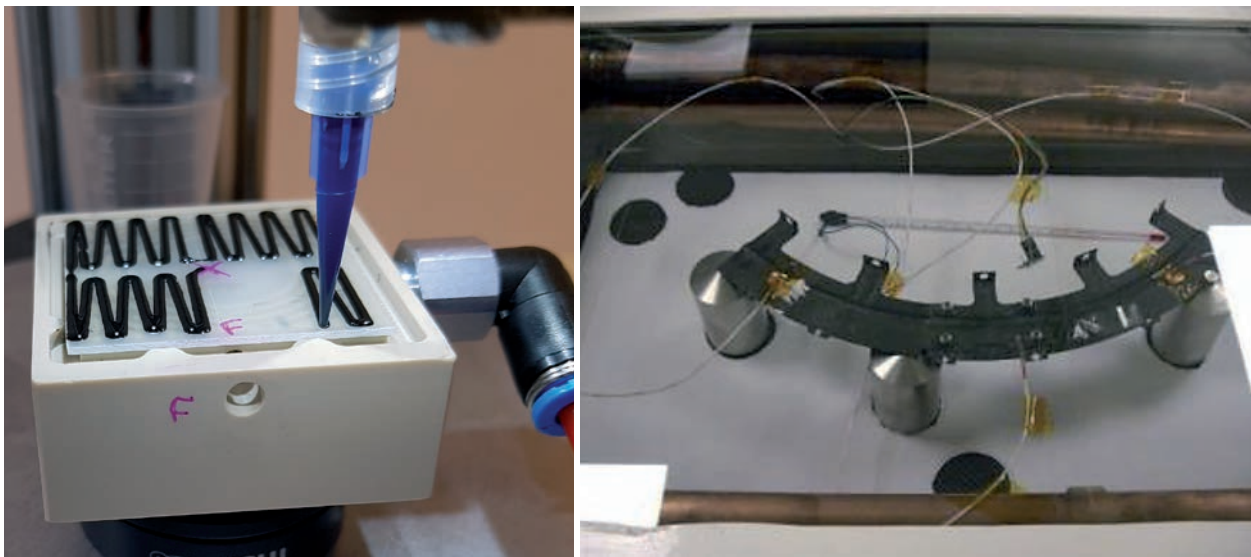


Figure 1. (SDI, crédit photo : P. Stassi, CNRS - SERM, crédit photo : N. Emeriaud, CNRS).

Gauche : dépôt de colle automatique par imprimante 3D. Droite : prototype de support intermédiaire dans sa boîte froide de test.

Début 2020, un ingénieur du LPSC a accepté la responsabilité des services dits 'de type-1' pour la partie OB après sollicitation de la collaboration ATLAS-ITk. Ces faisceaux de câbles concentrent les services raccordés aux modules de détection et les amènent aux connecteurs reliant le détecteur à l'extérieur. Ils alimentent les modules en haute tension, les puces de lecture et de contrôle en basse tension, et transmettent d'autres données telles que la température. Les câbles ont été choisis et les circuits imprimés permettant de les connecter ont été dessinés (figure 2). La validation de l'ensemble a commencé en 2021 avec des tests au feu et des tests électriques, y compris sur prototype irradié. La définition du flux de production et du contrôle qualité a également commencé en 2021, en vue de la revue de conception finale fin 2022.

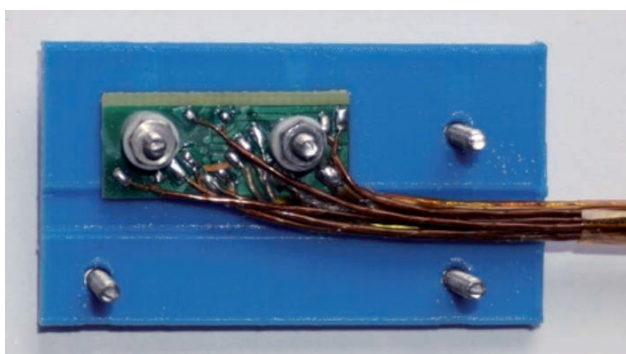


Figure 2. (SE, crédit photo : L. Eraud, CNRS).

Premiers essais de soudure des câbles de type-1 sur les circuits imprimés permettant leur connexion du côté des modules de détection.

Refroidissement par CO₂ diphasique

Le nombre des canaux d'électronique de l'ITk sera d'environ 6 milliards (à comparer aux 99 millions dans le détecteur silicium actuel), engendrant une dissipation de chaleur de 300 kW. Depuis 2016, le LPSC est partenaire du CERN dans la conception du système de réfrigération de cet appareil. Ce système utilise une boucle de dioxyde de carbone diphasique (liquide-gaz) dont la pression et la température (jusqu'à -45 °C) sont pilotées par un réservoir sous pression appelé accumulateur. Étant donné l'énorme volume à refroidir, cet accumulateur en acier inoxydable peut contenir jusqu'à 400 litres de CO₂ sous une pression pouvant atteindre 100 bars. Il est instrumenté de façon à pouvoir mesurer en temps réel les pressions et les températures de toutes ses dépendances et à piloter ainsi la pression (et donc la température) de la boucle de refroidissement. Le premier accumulateur conçu et construit par le LPSC (figure 3) a été livré au CERN en janvier 2022. Il comporte plus de 300 composants qui ont dû être assemblés par soudure TIG (électrode



Figure 3. (SERM, crédit photo : Y. Herpin, CNRS).

Accumulateur utilisé dans le système de refroidissement de certains futurs sous-détecteurs de ATLAS, avant sa livraison au CERN en janvier 2022.

de tungstène et gaz inerte) sur tuyauterie à haute pression (100 bars) : au total 285 soudures de très haute technicité, dont la majorité a été réalisée au laboratoire. Son installation au sein de la première station de refroidissement nommée DEMO est en cours. La mise en service et les tests de l'ensemble sont prévus durant l'année 2022. Six stations de la sorte seront nécessaires pour maintenir la température d'ATLAS.

Traitement des données

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 d'ATLAS et disponible pour d'autres usages.

Activités de reconstructions des objets

Étalonnage de l'énergie des jets

Les jets hadroniques, phénomènes QCD résultant de l'émission de partons sont abondamment produits dans les collisions de protons : ils font partie de toutes les analyses physiques en tant que composants du signal ou des bruits de fond. Leur reconstruction et identification expérimentale sont donc des tâches primordiales pour ATLAS, et le LPSC est fortement impliqué sur ces sujets. Depuis plusieurs années l'équipe maintient plusieurs activités dans le groupe "JetEtmiss" de la collaboration. Du point de vue technique, nous contribuons fortement au maintien et développement des logiciels dédiés à la reconstruction des jets dans le cadre logiciel Athena, par exemple une réécriture du système de configuration de ces logiciels pour le "Run 3" (prise de données entre 2022 et 2025) a été réalisée.

Par ailleurs plusieurs travaux sur les performances de reconstruction des jets hadroniques ont été portés par l'équipe. Tout d'abord des travaux ont été menés sur la façon dont les constituants des jets peuvent être construits en combinant optimalement les

informations issues du détecteur de traces avec celles du calorimètre. Nous avons montré les améliorations apportées par ces constituants et ces méthodes ont été adoptées par la collaboration ^[6]. L'équipe contribue aussi aux méthodes de calibration des jets. En particulier deux doctorants ont travaillé sur ces sujets, d'un côté en optimisant les méthodes existantes et les appliquant aux nouveaux constituants et de l'autre en développant des réseaux de neurones innovant pour calibrer simultanément l'énergie et la masse des jets de grand rayon, et améliorer significativement la résolution sur ces grandeurs. Ici encore ces méthodes sont adoptées, ou en cours d'adoption, par la collaboration.

Reconstruction des électrons et photons

La reconstruction précise des électrons et photons – objets électromagnétiques (EM) – tient un rôle fondamental dans la recherche de nouvelles particules ou la mesure précise des processus du modèle standard (MS) et des propriétés des particules fondamentales comme le boson de Higgs. Après s'être spécialisée dans la reconstruction des photons, l'équipe a également pris une part importante dans l'étalonnage de l'énergie des objets EM, notamment en vue de la mesure finale de la masse du boson de Higgs avec les données enregistrées entre 2015 et 2018 ("Run 2"). En outre, elle participe à la maintenance et l'évolution des logiciels de reconstruction et d'isolation (quantité permettant de séparer le signal des objets EM du bruit de fond, provenant essentiellement de jets hadroniques) ^[7].

Activités d'analyse de physique

Mesure de la luminosité

Une mesure précise de la luminosité intégrée est un des éléments essentiels à la bonne réalisation du programme de physique au LHC, en particulier pour les mesures de précision ; la valeur de la luminosité est souvent une source d'incertitude de premier plan.

La calibration des détecteurs de luminosité est réalisée pendant des périodes de collisions dédiées où est étalonné le profil des faisceaux en les déplaçant l'un par rapport à l'autre. Ces étalonnages ont tous été effectués avec un petit nombre de paquets de protons isolés et un bruit d'empilement faible. Les incertitudes totales sur la luminosité intégrée dans chaque ensemble de données et sur les combinaisons de données prises à chaque valeur d'énergie sont alors extraites puis combinées.

L'engagement de l'équipe a consisté en une analyse approfondie des données prises à une énergie dans le centre de masse de 900 GeV. Cette analyse a permis de mettre en évidence des effets jusqu'alors négligés de non linéarité magnétique qui ont un impact sur l'ensemble des mesures de luminosité. Une correction ad-hoc a été proposée afin de prendre en compte cet effet.

Secteur de Higgs

Depuis la découverte du boson de Higgs en 2012, la collaboration ATLAS est engagée dans une étude détaillée de la particule, composant essentiel du modèle standard.

L'observation de la production de paires de bosons de Higgs est l'un des buts principaux du programme de physique de ATLAS, car elle est sensible à l'interaction à trois bosons de Higgs, un couplage qui façonne la forme du potentiel scalaire. Dans le cadre du MS, cette production est trop faible pour être observée avec la quantité de données disponible à ce jour. Toutefois, de nombreux modèles au-delà du modèle standard prédisent une augmentation sensible de la section efficace de production, notamment via l'intermédiaire de nouvelles particules. C'est dans ce contexte que le LPSC s'est engagé entre 2017 et 2021 dans la recherche d'une résonance se désintégrant en deux bosons de Higgs, dans le canal à deux jets issus de quark b et deux photons $X \rightarrow hh \rightarrow bb\gamma\gamma$ ^[4].

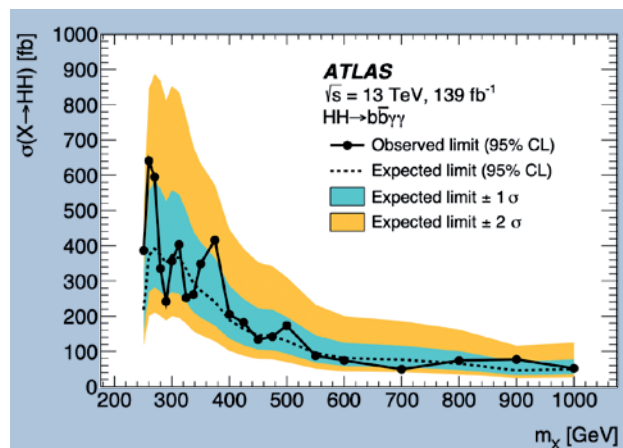


Figure 4.

Limites supérieures observée et attendue sur la section efficace de production d'une résonance scalaire X de petite largeur en fonction de sa masse. La courbe continue (en tiret) représente la limite observée (attendue en l'absence de signal). Les variations à $\pm 1\sigma$ et $\pm 2\sigma$ dues aux incertitudes statistique et systématiques autour de la limite attendue sont représentées par les bandes bleue et jaune. Extrait de [4].

Si la recherche réalisée avec l'ensemble des données du "Run 2" s'est révélée infructueuse, il a toutefois été possible d'assigner une limite supérieure sur la section efficace de production (figure 4). Ce résultat a été combiné avec ceux obtenus par la collaboration ATLAS à l'aide d'autres états finaux. Au-delà de ce résultat, déjà très important en soi, cette analyse a permis de valider des techniques qui seront utilisées pour les futures analyses au "Run 3" et au-delà.

Le secteur de la saveur (i.e. la description des différentes familles de fermions et leurs interactions) 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 en 2012 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 nul à l'ordre dominant et extrêmement petit aux ordres supérieurs. Ce taux peut être considérablement accru dans des modèles de nouvelle physique (souvent beaucoup plus que les taux correspondants aux désintégrations impliquant des bosons vecteurs), et l'équipe s'est impliquée dans la recherche de ce processus, lorsque le boson de Higgs se désintègre en une paire de photons. Jusqu'à présent, aucun taux anormal n'a été observé.

Matière noire et QCD sombre

Environ 85% du contenu en masse de l'univers est sous une forme encore inconnue, appelée matière noire, qui pourrait être formée de particules qu'il est possible de rechercher avec l'expérience ATLAS. L'équipe est fortement impliquée dans ces recherches, participant à la publication, en 2019, d'un article résumant et combinant les différentes recherches faites dans le contexte de modèles dits simplifiés [1]. Afin de maximiser la portée des résultats expérimentaux, il est important de s'assurer qu'ils soient présentés de telle façon à pouvoir être réinterprétés dans d'autres modèles [2]. Dans le même esprit d'exploiter au mieux les données, il est aussi intéressant de rechercher des scénarios moins bien explorés qui demandent une très bonne maîtrise des objets reconstruits dans le détecteur, maîtrise qui peut maintenant s'appuyer sur des années de bon fonctionnement. Le scénario désormais étudié par l'équipe est l'existence d'un secteur de type QCD sombre (contenant un candidat à la matière noire) se manifestant dans le détecteur par des jets aux caractéristiques inhabituelles, tant au niveau des traces associées dans le détecteur interne qu'au développement de la gerbe dans les calorimètres suite à la désintégration des particules du secteur sombre qui peuvent avoir de longs temps de vie (figure 5). Le travail sur la période 2019-2021 a porté sur la recherche de telles particules avec l'ensemble des données du "Run 2", en cours, et sur la caractérisation des signaux attendus à travers l'exercice Snowmass2021 [3]. Avec le démarrage du "Run 3", la recherche de ce type de signaux se poursuit, avec un focus sur les modèles donnant des particules au long

temps de vie pour lesquels de nouvelles sélections au niveau du système de déclenchement sont maintenant disponibles. Ce travail se fait dans le cadre d'une ANR approuvée en 2021 (DMwithLLPatLHC), en lien étroit avec les études de performance sur les jets.

Futurs collisionneurs circulaires

À partir de 2019 le laboratoire s'investit dans le Master-Projet FCC-Physique, dédié à l'étude du potentiel de physique des futurs collisionneurs circulaires (Future Circular Collider, FCC). Dans sa version ee (collisions électron-positon), avec une énergie dans le centre de masse variant de 85 GeV à 370 GeV, le FCC devrait fournir une statistique abondante, avec par exemple 5 ab^{-1} pour l'usine à bosons de Higgs ($\sqrt{s} = 240 \text{ GeV}$, environ 10^6 bosons de Higgs produits) et 150 ab^{-1} pour l'usine à Z ($\sqrt{s} \approx 91 \text{ GeV}$, environ 3×10^{12} Z visibles produits), dans un environnement propre, permettant des mesures d'ultra-précision. Le programme qui nous intéresse est l'étude des données à la résonance du Z afin de mesurer les observables électrofaibles ; celles-ci permettent de contraindre, indirectement mais très fortement, les modèles de nouvelle physique, grâce notamment aux faibles incertitudes théoriques affectant leurs prédictions. Nous avons étudié les possibilités de la détermination des asymétries avant-arrière des quarks lourds (b- et c-) et du lepton tau. L'asymétrie pour les quarks b est l'une des mesures effectuées au LEP qui dévie le plus de la prédiction, et le FCC-ee devrait permettre de clarifier cette petite anomalie. Un master projet FCC-détecteurs est en cours de création. Le LPSC pourra contribuer, en particulier aux développements du calorimètre électromagnétique.

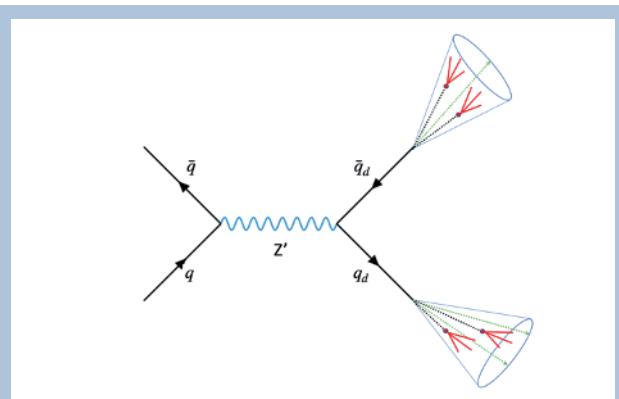


Figure 5. ©M.-H. Genest, LPSC, IN2P3, CNRS.

Production de quarks sombres à travers un médiateur Z' : les quarks sombres s'hadronisent ensuite dans le secteur sombre. Les hadrons sombres ainsi produits peuvent être stables (lignes pointillées vertes) et invisibles ou encore instables (lignes pointillées noires) et se désintègrent avec un temps de vie plus ou moins long en particules du modèle standard (lignes rouges), donnant lieu à des jets (cônes bleus) aux propriétés particulières, dont par exemple la présence de vertex déplacés (points rouges).

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *Recherche d'une nouvelle particule dans le canal $HH \rightarrow \gamma\gamma bb$ avec le détecteur ATLAS*, R. Hulskén, thèse de doctorat, novembre 2021, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03579574/document>
- *Measurement of the production of the standard Higgs boson associated to a pair of top and antitop quarks and search for a charged Higgs boson decaying into a pair of t and b quarks with the ATLAS detector at LHC*, X. Yang, thèse de doctorat, juin 2020, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03100122/document>
- *Recherche de matière noire avec le détecteur ATLAS : de la supersymétrie à la production directe*, M.-H. Genest, HDR, 2020, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02896134/document>.
- *Discovery of the Higgs boson and study of its properties using photons and leptons with the ATLAS experiment at the LHC*, M. Kuna, HDR, 2019, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02180385/document>.

Principales publications (auxquelles ont contribué certains membres de l'équipe sur la période 2019-2021)

1. *Constraints on mediator-based dark matter and scalar dark energy models using $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collision data collected by the ATLAS detector*, ATLAS Collaboration, JHEP 05 (2019) 142, [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/JHEP05\(2019\)142.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/JHEP05(2019)142.pdf), <https://arxiv.org/abs/1903.01400>.
2. *Reinterpretation of LHC Results for New Physics: Status and Recommendations after Run 2*, W. Abdallah et al, SciPost Phys. 9 (2020) 022, <https://scipost.org/SciPostPhys.9.2.022/pdf>, <https://arxiv.org/abs/2003.07868>.
3. *Theory, phenomenology, and experimental avenues for dark showers : a Snowmass 2021 report*, G. Albouy et al (M.-H. Genest & S. Kulkarni editors), <https://arxiv.org/abs/2203.09503> (soumis à EPJC).
4. *Search for Higgs boson pair production in the final state with two bottom quarks and two photons in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV with the ATLAS detector*, ATLAS Collaboration, Phys. Rev. D 106, 052001, <https://journals.aps.org/prd/pdf/10.1103/PhysRevD.106.052001>, <https://arxiv.org/abs/2003.07868>.
5. *ATLAS data quality operations and performance for 2015–2018 data-taking*, ATLAS Collaboration, JINST 15 (2020) P04003, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/04/P04003/pdf>, <https://arxiv.org/abs/1911.04632>.
6. *Optimisation of large-radius jet reconstruction for the ATLAS detector in 13 TeV proton–proton collisions*, ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 334, <https://link.springer.com/content/pdf/10.1140/epjc/s10052-021-09054-3.pdf>, <https://arxiv.org/abs/2009.04986>.
7. *Electron and photon performance measurements with the ATLAS detector using the 2015–2017 LHC proton–proton collision data*, ATLAS Collaboration, JINST 14 (2019) P12006, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/14/12/P12006/pdf>, <https://arxiv.org/abs/1908.00005>.
8. *The ATLAS Publication Process Supported by Continuous Integration and Web Framework*, J.-P. Araque et al, JINST 16 (2021), T05006, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/16/05/T05006/pdf>, <https://arxiv.org/abs/2005.06989>.

Ressources Web

- ATLAS, site public : <https://atlas.cern>
- ATLAS-LPSC, site ITk : <http://cern.ch/go/8KPg>
- ANR DMwithLLPatLHC : <https://lpsc.in2p3.fr/index.php/en/66667068>

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.

Équipe de recherche : membres permanents

Aurélien Barrau, Marianne Mangin-Brinet, Sabine Kraml, Killian Martineau, Jérémie Quevillon, Ingo Schienbein, Christopher Smith (responsable d'équipe).

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Gael Alguero (doctorant), Fernando A. Aragon (post-doctorant), Pierre-Henri Cahue (doctorant), Maxime De Sousa (doctorant), Rémy Larue (doctorant), Chloé Leger (doctorante), Timothée Pascal (doctorant), Cyril Renevey (doctorant), Lohan Sartore (doctorant), Hoa Vuong (doctorant).

Phénoménologie BSM et (ré)interprétation des résultats du LHC

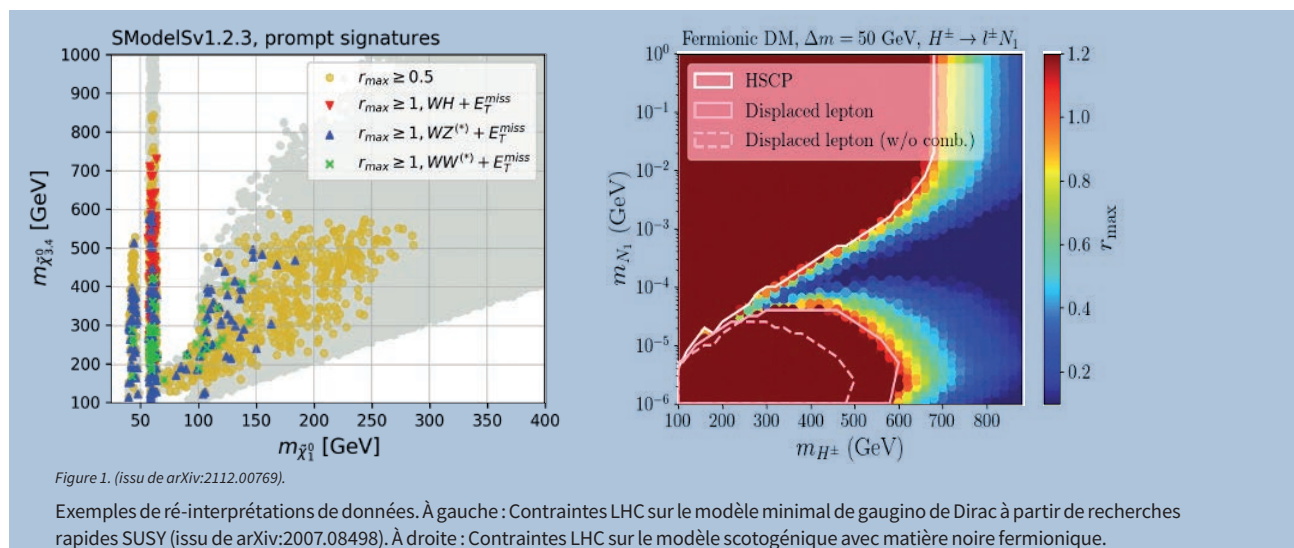
Après la découverte du boson de Higgs, la recherche de nouvelle physique est devenue l'objectif principal du programme de physique du LHC. Pour cela, les expériences LHC poursuivent un vaste programme de mesures de précision de processus connus ainsi que des recherches directes de nouvelles particules 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'UV) 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.

Les travaux récents (2019-2021) incluent une analyse complète des contraintes LHC et matière noire sur la supersymétrie avec gauginos de Dirac (thèse de H. Reyes Gonzalez), la rédaction du rapport "Status and Recommendations after Run 2" du forum de réinterprétation (dirigé par S. Kraml) ainsi que le développement du code Lilith-2 pour l'étude des contraintes sur la nouvelle physique à partir des mesures de Higgs au Run 2 du LHC. De plus,

nous avons effectué un calcul des corrections NLO QCD à la production électrofaible des paires de quark top en présence de nouvelles résonances de spin-1 (Z' , W'). Ce calcul a été mis en œuvre dans le cadre de CONTUR (Constraints On New Theories Using Rivet) et nous avons testé des théories BSM au travers de comparaisons globales à des mesures fiducielles, contribuant en particulier à CONTUR (thèse de M.M. Altakach). Nous avons également travaillé sur les équations de groupe de renormalisation pour des théories de jauge générales, nécessaire pour lier des théories à différentes échelles d'énergie. Un outil public, PyR@TE3, a été développé et utilisé pour étudier des théories de grande unification et des lois proposées pour fixer les paramètres d'une théorie à une échelle proche de l'échelle de Planck (thèse de L. Sartore).

En ce qui concerne les approches globales, nous avons développé le concept de "proto-modélisation artificielle" pour la construction "bottom-up" de BSM à partir des données du LHC. De nouveaux développements majeurs ont également eu lieu dans SModelS, particulièrement en ce qui concerne le traitement des particules à grandes durées de vie. Un point d'importance pour la ré-utilisation et la préservation de l'analyse est le traitement statistique appliqué. Ici, S. Kraml a lancé un livre blanc sur la publication de modèles à probabilité complète ("full probability models") afin d'exploiter au mieux les expériences de physique des particules, et nous avons été les pionniers de l'utilisation de modèles statistiques complets d'ATLAS dans les outils de réinterprétation.

Ces travaux sont menés dans le cadre du Master projet IN2P3 "BSM Global Analyses" (porteur : Sabine Kraml).



Détermination des amplitudes de distribution des mésons

Le projet principal développé en QCD sur réseau concerne la détermination des amplitudes de distribution des mésons (pion, kaon, charmonium...). 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 approprié. Cependant, ces quantités sont délicates à estimer sans recourir à des méthodes fondées sur les premiers principes de la théorie des champs. Réaliser un tel calcul en QCD sur réseau est précisément l'objectif du projet mené par des experts nationaux et internationaux, qui ont développé un savoir-faire remarquable et une approche particulièrement ingénieuse pour calculer les distributions de parton dans le nucléon et les distributions d'amplitude du pion.

Ce travail est mené dans le cadre du Master projet IN2P3 "speedy charmonia" (porteur : Benoît Blossier).

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. Une collaboration a été initiée avec l'IJCLab, ainsi qu'une participation au projet QC2I de l'IN2P3.

Wave packet evolution on IBM quantum computer

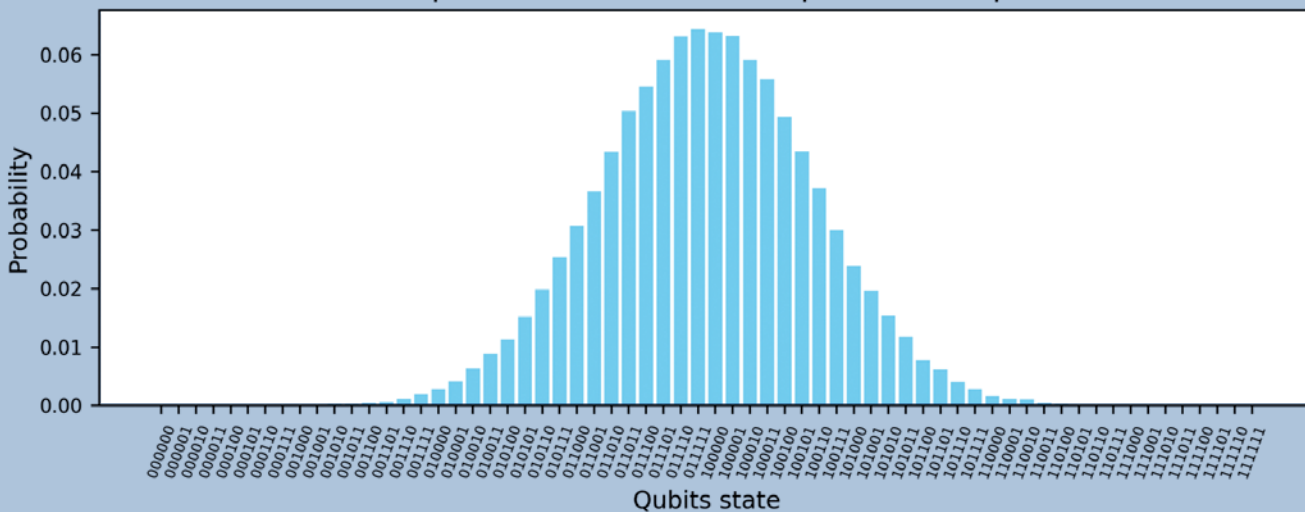


Figure 2. (Crédits : M. Mangin-Brinet, LPSC, CNRS).

Paquet d'onde simulé sur 6 qubits. .

Détermination de distributions de partons et production de saveurs lourdes

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 de gluons. Ces PDF sont d'une importance primordiale pour la physique moderne des hautes énergies, qui se concentre sur l'étude des interactions entre particules élémentaires telles les quarks et gluons. La connaissance aussi précise que possible

des PDF, c'est-à-dire de la structure des hadrons, est indispensable pour exploiter au mieux les résultats expérimentaux des collisionneurs de haute énergie utilisant des hadrons dans l'état initial comme le LHC ou le futur EIC (électron-ion collider).

Ces trois dernières années, un sujet principal était la densité du gluon dans des noyaux en utilisant des données de différents processus mesurés auprès des collisionneurs LHC et RHIC : la production de saveurs lourdes, hadrons inclusive, et prompt photons (en cours, thèse de C. Léger). Nous avons également étendu notre analyse globale nCTEQ dans la région de grand x et petit Q . Dans une autre analyse nous avons utilisé des données de production de bosons W et Z au LHC en collisions p -Pb pour étudier la densité du quark étrange dans le noyau de plomb.

Concernant la production de saveurs lourdes dans des collisions p - p au LHC nous avons fait des prédictions pour la production des Λ_c^\pm , $\psi(2S)$ et $X(2872)$ et comparé avec des données du LHC.

La physique des axions et l'haloscope GrAHal

Un des problèmes les plus sérieux du Modèle Standard est sa prédiction naturelle de violation CP par les interactions fortes. Cette violation serait observable comme un moment dipolaire pour le neutron. Celui-ci n'ayant pas été observé, les limites actuelles imposent un ajustement des paramètres libres inacceptable, de l'ordre d'une part sur 10 milliards. L'axion est une réponse à cette énigme, car son existence découle du mécanisme de Peccei-Quinn, garantissant automatiquement l'absence de violation CP forte. Par ailleurs, l'axion a d'autres attributs, comme celui d'être un candidat prometteur de matière noire.

Ces trois dernières années, notre équipe s'est fortement investie dans l'étude des modèles d'axions. Nous avons tout d'abord revu les fondements des

modèles d'axions, et décrit pour la première fois leurs couplages à tous les bosons de jauge du Modèle Standard. Ensuite, nous nous sommes attachés à étudier les liens entre l'axion et les symétries accidentelles du Modèle Standard, les nombres leptonique et baryonique, que ce soit de manière effective, en théorie de grande unification, ou en présence de leptoquarks. En effet, l'existence d'une violation de ces nombres est en général nécessaire pour expliquer l'asymétrie matière-antimatière de l'univers. Lier ainsi nombre baryonique et leptonique à la dynamique de l'axion, composant de la matière noire, pourrait l'amener à jouer un rôle primordial dans le mécanisme de baryogénèse.

En parallèle, notre équipe a rejoint la collaboration GrAHal, qui vise à développer puis opérer un haloscope à Grenoble. La mise en service prochaine d'un aimant très puissant au LNCMI permettrait 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.

Théories Effectives des Champs

Le Modèle Standard des interactions fondamentales est en parfait accord avec les expériences. Il y a néanmoins beaucoup des raisons différentes de croire qu'il doit y exister d'autres particules et interactions, à des échelles d'énergies plus grandes, et même des particules légères couplées très faiblement au secteur observable, notamment l'axion, une particule pseudo-scalaire, qui permettrait de résoudre le puzzle de la conservation de la symétrie CP dans les interactions fortes.

Nous développons des méthodes, basées sur l'intégrale de chemin, pour calculer des corrections quantiques au lagrangien du Modèle Standard, en tenant compte

de l'existence éventuelle des particules lourdes, signe d'une nouvelle physique liée en particulier à des symétries de type Peccei-Quinn. Ces méthodes permettent de calculer des couplages de basse énergie contenus dans des opérateurs de dimension supérieure à quatre. Ces couplages font partie de ce qu'on appelle la théorie effective des champs du Modèle Standard.

Nous avons obtenu des résultats nouveaux sur le calcul des couplages des axions au secteur observable, leur dépendance en la saveur des quarks et leptons, et sur la relation de ces couplages aux anomalies quantiques. Cela contient aussi des nouveaux calculs de l'action quantique, incluant des corrections à une boucle des particules lourdes et légères, et des applications à des modèles théoriques allant au-delà du Modèle Standard, qui essaient d'expliquer les éventuelles anomalies de saveurs dans les données expérimentales de physique des particules.

Phénoménologie d'aspects quantiques de la gravitation

Les incohérences internes de la relativité générale ainsi que les choix arbitraires apparaissant dans sa construction motivent la recherche d'un cadre théorique plus global pour décrire la gravitation. La meilleure description de la matière que nous ayons étant une approche quantique, il semble alors naturel de tenter de caractériser et mettre en évidence une nature quantique du champ gravitationnel. Après avoir été cantonnée à la pure physique théorique durant des décennies, la recherche d'une théorie quantique de la gravité entre désormais, grâce aux nouvelles observations cosmologiques (amélioration des mesures des anisotropies du fond diffus cosmologique) et astrophysiques (découverte des ondes gravitationnelles) dans le giron de la science observationnelle. La caractérisation d'effets observables de gravité quantique, d'importance heuristique majeure, est désormais un enjeu majeur pour la communauté. Le groupe de physique théorique du LPSC est impliqué dans cet effort de recherche, développant la phénoménologie des théories de gravité quantique les plus avancées (gravitation quantique à boucles, théorie des cordes, ...).

Notamment, A Barrau, K. Martineau et leurs doctorants F. Moulin et C. Renevey ont utilisé les prévisions associées aux contraintes mises par les grands relevés galactiques (fournis par l'observatoire Vera Rubin et Euclid) et hydrogène (fourni par le Square Kilometer Array) sur l'équation d'état de l'énergie noire afin de quantifier dans quelle mesure ces relevés pourront mettre la théorie des cordes sous pression, dans le cadre du "swampland" et de la conjecture de-Sitter. A minima, la validité des modèles de quintessence pour l'énergie noire sera, dans ce contexte, mise à rude épreuve.

Dans le secteur des trous noirs, tous les yeux sont rivés vers les observations des grands interféromètres LIGO-Virgo-Kagra. Les pulsations complexes des modes quasi-normaux émis lors de la phase finale de coalescence, dite de "ringdown", constituent des sondes privilégiées pour sonder la structure de l'espace-temps proche des horizons. Le groupe a calculé ces pulsations pour différentes théories de gravité au-delà de la relativité générale, montrant entre autres que les effets de nouvelle physique se manifestent préférentiellement sur la fréquence réelle de ces modes que sur leur taux d'amortissement ou que le caractère cumulatif d'effets quantiques au-delà de l'horizon pourrait être mis en évidence pour des trous noirs bien plus lourds que la masse de Planck.

Le groupe s'est également intéressé aux prédictions associées à un rebond de courbure, prédiction non exotique de la relativité générale dès lors que les hypersurfaces spatiales possèdent une courbure positive et

que cette dernière est extrapolée jusqu'à une phase d'inflation primordiale. Les spectres de puissance primordiaux ont été calculés explicitement, pour différentes formes du potentiel d'inflaton, puis extrapolés jusqu'à obtention des anisotropies en température

du CMB. Les prédictions sont compatibles avec les mesures actuelles bien que des déviations (augmentation ou diminution de la puissance) par rapport au paradigme standard puisse apparaître aux grandes échelles.

POUR EN SAVOIR +

Thèses et HDR

- *Quelques aspects de cosmologie et de physique des trous noirs en gravitation quantique à boucles*, K. Martineau, thèse encadrée par A. Barrau, <https://www.theses.fr/2019GREAY044> (septembre 2019).
- *Quelques aspects de la violation CP et interactions de jauges dans le modèle standard et au-delà*, S. Touati, thèse encadrée par C. Smith, <https://www.theses.fr/2019GREAY040> (octobre 2019).
- *Two-loop RGEs for general gauge theories and some aspects of BSM Higgs phenomenology*, K. Svirina, thèse encadrée par I. Schienbein, <https://www.theses.fr/253335183> (juin 2020).
- *Quelques aspects de physique des trous noirs, cosmologie et théorie quantique des champs*, F. Moulin, thèse encadrée par A. Barrau (octobre 2020).
- *Au-delà de la nouvelle physique standard au LHC*, H. Reyes Gonzalez, thèse encadrée par S. Kraml, <https://www.theses.fr/2020GRALY037> (octobre 2020).
- *Prédictions précises pour les observables des quarks top au LHC en présence de bosons Z' et W'* , M. Altakach, thèse encadrée par I. Schienbein, <http://www.theses.fr/2021GRALY032> (mai 2021).
- *Effective Field Theory Perspective to Physics Beyond the Standard Model*, J. Quevillon, HDR (juin 2021).
- *Facteurs de forme hadroniques en chromodynamique quantique sur réseau pour la physique du B et renormalisation non perturbative*, P.H. Cahue, thèse encadrée par M. Mangin Brinet <https://www.theses.fr/2021GRALY077> (novembre 2021).

Sites ressources

- LHC BSM Reinterpretation Forum: <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/InterpretingLHCresults>

Outils publics (développés par les membres de l'équipe)

- SModelS (interpreting simplified model results from the LHC): <https://smodels.github.io/>
- Lilith-2 (Light Likelihood Fit for the Higgs): <https://github.com/sabinekraml/Lilith-2>
- MadAnalysis5 & Public Analysis Database: <https://madanalysis.irmp.ucl.ac.be/wiki/PublicAnalysisDatabase>
- PyR@TE3, <https://github.com/LSartore/pyrate>

ÉQUIPE NEUTRONS ULTRAFROIDS (UCN)

L'équipe s'intéresse aux tests des symétries fondamentales en réalisant des expériences de précision avec des neutrons ultrafroids (UCNs). Ce sont des neutrons de très faible énergie, environ 10^{-7} eV. 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 en Suisse. Cette mesure permet de tester la symétrie T de renversement du sens du temps, l'objectif étant de découvrir une nouvelle interaction au-delà du Modèle Standard, possiblement responsable de l'asymétrie matière antimatière générée pendant la baryogénèse dans l'Univers primordial.

Équipe de recherche : membres permanents

Benoit Clément, Guillaume Pignol (responsable d'équipe), Konstantin Protassov, Dominique Rebreyend, Stéphanie Roccia

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Doctorant(e)s : Thomas Bouillaud, Laura Ferraris-Bouchez, Yingao Xi.

Post-doctorant(e)s : Arnaud Leredde, Kseniia Svirina, Sélim Touati, Romain Viot

Personnels des services techniques

Mile Kusulja, Johann Menu, Francis Vezzu, atelier (Service Études et Réalisations Mécaniques),
Guillaume Dargaud, Jérôme Fulachier (Service Informatique),
Clément Thomassé, Julien Marpaud (Service Détecteur et Instrumentation),
Ludovic Eraud, Christophe Hoarau, Damien Tourres (Service Electronique).

Mesure du moment dipolaire électrique du neutron

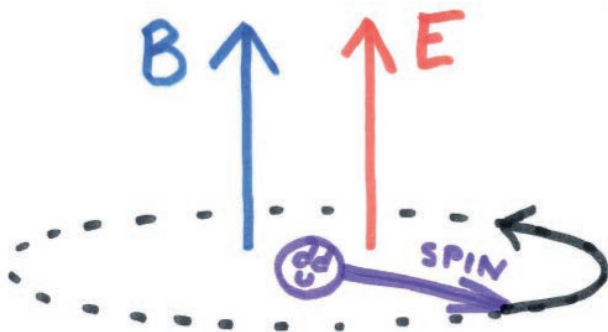


Figure 1. (Crédits : Guillaume Pignol, LPSC).

Illustration de la précession du spin d'un neutron dans un champ magnétique (B) et électrique (E).

Le neutron, comme le proton et l'électron, est une particule de spin $\frac{1}{2}$. Il est possible d'agir sur la direction du spin en appliquant un champ magnétique \vec{B} , c'est ce phénomène qui est à la base de la résonance magnétique nucléaire. La collaboration nEDM se demande si l'on peut aussi agir sur le spin en appliquant un champ électrique \vec{E} . Si c'était le cas, cela constituerait une violation de la symétrie T du renversement du temps, et donc aussi de la symétrie CP en vertu du théorème CPT. Le moment dipolaire électrique d_n du neutron quantifie le possible couplage du spin au champ électrique, $\hat{H} = -d_n \hat{\sigma} \cdot \vec{E}$.

L'équipe UCN a contribué à la mesure la plus récente, dont le résultat est compatible avec zéro^[1]:

$$d_n = (0 \pm 1.1_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{syst}}) \times 10^{-26} \text{ e cm.}$$

Dans cette expérience, qui a collecté ses données au PSI en 2015 et 2016, des neutrons ultrafroids polarisés étaient exposés, par cycles de 5 minutes, à une

combinaison d'un faible champ magnétique B et d'un fort champ électrique E . À chaque cycle, on extrait la fréquence de précession des spins f_n , en comptant les neutrons séparément pour les deux projections du spin. Le problème est que le terme électrique est minuscule ($d_n E / \pi \hbar \approx 10^{-7}$ Hz pour $d_n = 10^{-26}$ e cm et $E = 15$ kV/cm) comparé au terme magnétique ($f_n \approx 30$ Hz pour $B = 1$ μ T). On mesure en fait la fréquence de précession pour les deux polarités du champ électrique (i.e. valeurs positives et négatives de E) pour séparer le terme électrique du terme magnétique. Mais la stabilité du champ magnétique entre chaque cycle pose problème. Malgré le grand blindage magnétique qui atténue les fluctuations du champ ambiant, la stabilité n'est en fait pas suffisante, et on doit encore mesurer en ligne les variations du champ magnétique B avec un magnétomètre atomique.

Les données de cette expérience ont été analysées dans la période 2016 – 2020 par deux équipes indépendantes "à l'aveugle". L'équipe UCN du LPSC a été responsable de l'une des deux analyses (dite analyse de l'Ouest). Outre le développement de la chaîne d'analyse statistique, il a aussi fallu évaluer les erreurs systématiques. L'effet systématique principal est associé au défaut d'uniformité du champ magnétique^[2]. La thèse de Laura Ferraris-Bouchez, soutenue en 2020, a été consacrée à la correction de cet effet. Laura a développé une analyse assez sophistiquée des données de cartographies du champ magnétique^[3]. Les analyses de l'Est et de l'Ouest ont été déclarées finales en 2019, et le "unblinding" a eu lieu fin 2019.

Le résultat final a été publié en 2020, c'est à l'heure actuelle la mesure de référence du moment dipolaire électrique du neutron. Il contraint fortement les extensions théoriques du Modèle Standard. Ces théories - en particulier celles qui pourraient expliquer l'origine de l'asymétrie baryonique de l'Univers - prédisent généralement de nouvelles interactions violant la symétrie CP et générant, par des boucles de particules virtuelles, une contribution sensible à d_n .

Préparation de l'expérience n2EDM

Pour améliorer encore la mesure de d_n , et espérer découvrir une valeur non nulle, la collaboration nEDM est maintenant engagée dans la construction de l'expérience de nouvelle génération n2EDM (new neutron Electric Dipole Measurement) [4]. Le volume des chambres de précession sera augmenté par facteur 6 par rapport à nEDM afin de stocker plus de neutrons ultrafroids et donc diminuer l'erreur statistique. Ainsi, il faudra produire un champ magnétique ultra-stable et très uniforme sur un grand volume (1 m^3). n2EDM est effectivement une installation très volumineuse, comme montré sur la figure 2.



Figure 2. (Crédits : Guillaume Pignol, LPSC).

Porte intermédiaire du blindage magnétique colossal de l'expérience n2EDM : 6 couches ferromagnétiques de haute perméabilité atténuant les variations externes du champ magnétique par facteur 100 000.

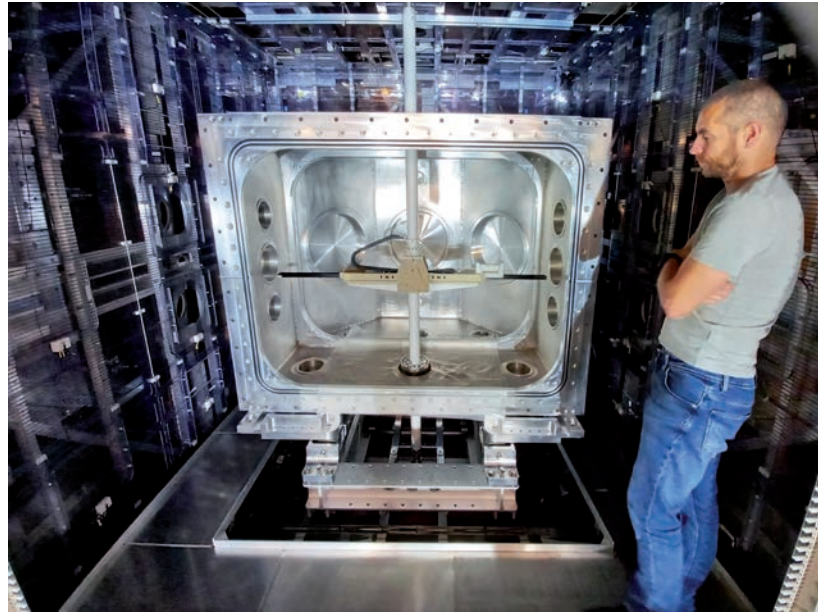


Figure 3. (Crédits : Kseniia Svirina, LPSC).

Le mapper, installé par Johann Menu (SERM) dans la chambre à vide (ici ouverte), à l'intérieur du blindage colossal de n2EDM au PSI

Le LPSC a en charge plusieurs sous-systèmes de ce nouvel appareillage : (i) le “mapper” (ii) le “switch” : un aiguillage à neutrons pour amener les UCNs de la source vers les chambres à l'aller et vers les détecteurs au retour, c'est un objet mécanique très complexe (iii) la partie interne du comagnétomètre atomique mercure (iv) l'interface web de visualisation des données.

Le mapper a été conçu et construit par Romain Virot (postdoc 2017-2020) et Johann Menu. C'est un robot permettant de déplacer une sonde magnétique pour cartographier le champ magnétique interne de n2EDM dans un volume utile de $1,5 \text{ m}^3$. La partie interne du robot est parfaitement amagnétique, la motorisation est déportée à l'extérieur du blindage. Le mapper a été livré et installé à PSI en juin 2021. Il a été mis en service et exploité par Kseniia Svirina (postdoc) et Thomas Bouillaud (doctorant) en 2021 pour caractériser le champ magnétique produit par la bobine B0. La thèse de Thomas porte sur les effets systématiques associés au défaut d'uniformité du champ magnétique.

Le L4M, un laboratoire de magnétométrie atomique au LPSC

La co-magnétométrie mercure joue un rôle central dans l'expérience nEDM en permettant de corriger les dérives temporelles du champ magnétique statique B et de maintenir ainsi la sensibilité statistique optimale de l'expérience. Depuis 2017, l'équipe UCN dispose d'une installation dans le Hall B dédié aux études sur la magnétométrie atomique. En particulier, une bourse de l'ERC a permis de faire l'acquisition en

2018 d'un laser à quadruplement de fréquence pour produire la lumière UV à 254 nm, qui permet de polariser et d'interroger les atomes de mercure. La figure 4 montre une vue d'ensemble de ce laboratoire qui a pris le nom de L4M : Laboratoire pour la Mesure du Moment Magnétique du Mercure. Arnaud Leredde (postdoc de 2017 à 2019) a eu un rôle central dans le développement du laboratoire. Il a conçu et mis en œuvre la stabilisation de la fréquence laser basée sur une spectroscopie sub-Doppler par absorption saturée, ainsi que le dispositif de remplissage des cellules. Fin 2018, la magnétométrie mercure était complètement opérationnelle. Le L4M a été exploité par Sélim Touati (postdoc entre 2020 et 2022) pour étudier le phénomène du "déplacement lumineux", un effet découvert par Cohen-Tannoudji qui correspond à un décalage de la fréquence de précession des atomes proportionnel à l'intensité de la lumière d'analyse.

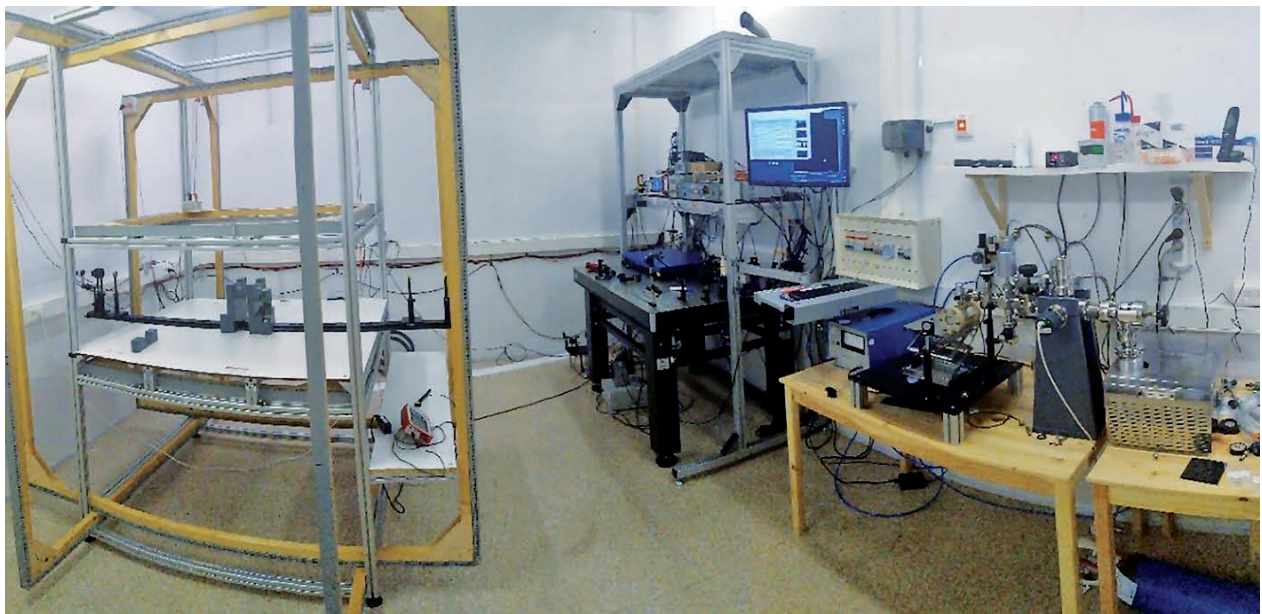


Figure 4. (Crédits : Dominique Rebreyend, LPSC).

Vue d'ensemble du L4M : de gauche à droite, on distingue (i) l'ensemble de 3 paires de bobines de Helmholtz pour compenser le champ magnétique terrestre et générer le champ statique B_0 et au centre desquelles se trouve la cellule de magnétométrie; (ii) la table optique sur laquelle se trouve le laser UV, le système de verrouillage en fréquence basé sur la spectroscopie d'absorption saturée et l'optique associée; (iii) le banc de remplissage qui permet de remplir la cellule de magnétométrie avec les mélanges gazeux souhaités.

Le développement d'un détecteur UCN de résolution micrométrique

L'expérience GRANIT, installée à l'Institut Laue Langevin, était une installation dédiée à l'étude des états quantiques des neutrons bondissants au-dessus d'un miroir. Dans le cadre de ce projet, l'équipe a développé un détecteur d'UCNs sensible à la position de résolution micrométrique, en collaboration avec l'équipe plasma du LPSC^{[7],[8],[9]}. Le concept du détecteur UCNBox est d'utiliser un capteur CCD commercial, sur lequel un dépôt d'une couche de bore-10 d'épaisseur 200 nm est réalisé par plasma. En outre, pour prolonger cette R&D sur les dépôts plasma, une étude des dépôts de bore sur un substrat de scintillateur inorganique a fait l'objet de la thèse de Yinghao Xi, soutenue en 2021 et co-encadrée par l'équipe Plasmas.

Le détecteur UCNBox a été exploité dans GRANIT pour mesurer l'effet de la sélection des états quantiques par une marche entre deux miroirs, la compréhension de cette sélection est cruciale pour

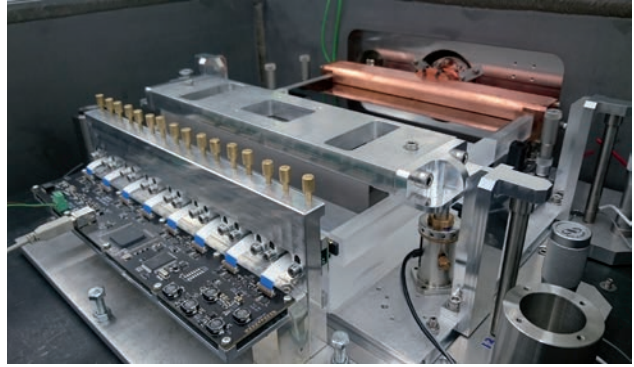


Figure 5. (Crédits : Benoit Clément, LPSC).

Le détecteur UCNBox est installé dans le spectromètre GRANIT à l'ILL. Le détecteur est composé de 8 capteurs (2048 x 64 pixels, 14 μ m x 14 μ m). On voit sur la photo 16 vis en laiton qui permettent d'aligner indépendamment chacun des 8 capteurs. On voit aussi en premier plan la carte électronique de lecture développée par le service électronique.

la mesure des transitions résonantes entre les états quantiques. Par ailleurs, l'équipe a obtenu en 2020 du temps de faisceau UCN sur l'instrument PF2 à l'ILL, spécifiquement pour mesurer la résolution spatiale du détecteur. On utilise l'ombre d'un fil de diamètre 10 μ m posé sur la surface du capteur, exposé aux UCNs. La reconstruction de l'ombre a permis de déterminer la résolution spatiale : $\sigma = 2 \mu$ m. C'est un progrès par rapport à l'état de l'art des détecteurs UCNs, démontrant la validité du concept du détecteur. Ainsi, le détecteur UCNBox pourrait être utilisé dans le futur pour étudier la structure spatiale des états du neutron bondissant.

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *Mesure du moment dipolaire électrique du neutron : correction de l'effet systématique du champ fantôme*, L. Ferraris-Bouchez (thèse soutenue en 2020), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03130525>.
- *Détecteur de neutrons ultra-froids sensible à la position*, Y. Xi (thèse soutenue en 2021), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03525828>.

Principales publications (très forte implication de l'équipe)

1. *Measurement of the Permanent Electric Dipole Moment of the Neutron*, nEDM collaboration, Phys. Rev. Lett 124 (2020), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.081803>.
2. *Magnetic-field uniformity in neutron electric-dipole-moment experiments*, nEDM collaboration, Phys Rev A 99 042112 (2019), <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.042112>.
3. *Mapping of the magnetic field to correct systematic effects in a neutron electric dipole moment experiment*, nEDM collaboration, Phys. Rev. A (2021), <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.032808>.
4. *The design of the n2EDM experiment*, nEDM collaboration, EPJC (2021), <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09298-z>.
5. *A magic magnetic field to measure the neutron electric dipole moment*, G. Pignol, Phys. Lett. B (2019), <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.05.014>.
6. *Theoretical Analysis of Antineutron-Nucleus Data needed for Antineutron Mirrors in Neutron-Antineutron Oscillation Experiments*, K. Protasov et al., Phys. Rev. D102, 075025 (2020), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.075025>.
7. *C2D8: An eight channel CCD readout electronics dedicated to low energy neutron detection*, O. Bourrion et al., NIMA 880 (2018), <https://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.10.072>.
8. *Boron-10 conversion layer for ultra-cold neutron detection*, B. Clément et al., JINST 14 (2019) no.09, P09003, <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/P09003>.
9. *Spatial resolution determination of a position sensitive ultra-cold neutron detector*, B. Clément et al., NIMA (2022), arXiv:2203.09335, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167212>.

ASTROPARTICULES, COSMOLOGIE & PHYSIQUE DES NEUTRINOS

Les équipes de recherche de l'axe "astroparticules, cosmologie et neutrinos" s'intéressent aux constituants élémentaires de l'Univers encore mal compris, 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 noyaux atomiques et des particules détectés 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 énergies 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 Auger, couvrant 3000 km² en Argentine, tandis que l'équipe Dark participe à l'analyse et l'interprétation des données d'AMS-02, 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, MIMAC, permettant d'isoler le recul nucléaire provoqué par la matière noire galactique de celui continûment 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 le télescope au sol LSST, 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

Depuis la découverte des rayons cosmiques d'énergie au-delà de 10^{19} eV, la question de leur origine reste mystérieuse. Pour étudier ces astroparticules, il faut recueillir une statistique de données très élevée, avec des mesures précises. L'Observatoire Pierre Auger, en Argentine, conçu pour étudier les rayons cosmiques d'ultra haute énergie (RCUHE) via les grandes gerbes atmosphériques, répond à ces critères grâce à une superficie de 3000 km² instrumentée par 1660 détecteurs de surface (SD) et de 27 télescopes de fluorescence (FD). Fonctionnant depuis plus de 15 ans, l'Observatoire est devenu l'expérience phare dans ce domaine. L'équipe "Auger" du LPSC, membre de la collaboration éponyme, est fortement impliquée dans le fonctionnement de l'Observatoire et dans l'analyse de ses données.

Équipe de recherche : membres permanents

Corinne Bérat (responsable), François Montanet.

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Carla Bleve (CDD), Julien Souchard (doctorant), Zoé Torrès (doctorante).

Personnels des services techniques

Mohamed Chala, Murielle Heusch, Pierre de Lamberterie, Patrick Stassi, Clément Thomassé (Service Détecteur et Instrumentation), Jean-Luc Bouly, Eric Lagorio, Jean-Pierre Scordilis (Service Électronique).

Fonctionnement de l'Observatoire Pierre Auger et projet AugerPrime

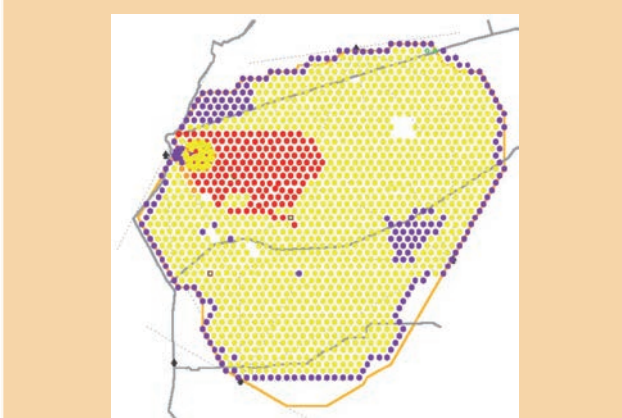


Figure 1. (origine : site web du contrôle en ligne de l'Observatoire).

Carte du réseau de surface (SD) de l'Observatoire Pierre Auger indiquant le statut du déploiement des éléments d'AugerPrime fin décembre 2021. Chaque point représente une station de détection appartenant au SD. En violet, les stations avec uniquement un détecteur Cherenkov à eau : il a été décidé de ne pas installer de scintillateurs sur les stations en pourtour du réseau, et deux zones n'ont pas pu être équipées à cause de problèmes avec les propriétaires des terrains ; en jaune, les stations comprenant un scintillateur installé sur une cuve Cherenkov à eau, et en rouge, celles équipées de la nouvelle électronique.

L'équipe a des responsabilités dans le fonctionnement du SD (contrôle en ligne, suivi des performances) ^[3] et participe au projet AugerPrime ^[4], destiné à accroître les performances de l'Observatoire, en permettant une meilleure identification de la nature des rayons cosmiques primaires, afin de répondre aux questions encore ouvertes sur l'origine et la composition des RCUHE. L'élément clé est une caractérisation de la composition de la gerbe atmosphérique, qui sera sensiblement améliorée par l'ajout de scintillateurs (SSD) sur chaque détecteur Cherenkov à eau constituant le SD. En effet, les scintillateurs ont une réponse aux muons et aux électrons/positrons/photons différente de celle des détecteurs Cherenkov (WCD).

Pour traiter à la fois les signaux des WCD et des SSD, une nouvelle électronique d'acquisition et de contrôle aux performances accrues est développée. En 2019, l'équipe a poursuivi et terminé l'assemblage et les tests de 90 SSD dont elle avait la charge et les a expédiés sur site. Entre 2019 et 2021, la production, la validation et le déploiement des SSD et de plus de 300 cartes électroniques ont été suivis, ainsi que leur *commissioning*.

Étude des photons d'ultra haute énergie

L'observation de photons au-delà de 10^{17} eV serait une avancée majeure en soi. Mais la non-observation de sources ponctuelles et de flux diffus de photons et de neutrinos par Auger a permis de contraindre très efficacement les modèles dit "top-down" de production des RCUHE et d'explorer les scénarios astrophysiques ^[1]. Dans ces derniers, les photons

UHE peuvent être produits par les interactions hadroniques des RCUHE à l'intérieur ou à proximité des sources astrophysiques. N'étant pas déviés par les champs magnétiques galactiques et extragalactiques, il serait possible d'identifier leurs sources. Les photons UHE peuvent également résulter de la désintégration des pions neutres produits lors de l'interaction des RCUHE avec les photons du CMB, ce qui aiderait à comprendre l'origine de la suppression du flux au-dessus de 50 EeV. La recherche de photons UHE constitue donc un moyen pour discriminer entre les différents scénarios proposés pour expliquer l'origine des RCUHE.

Recherche des photons dans les données d'Auger

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. Les gerbes de photons ont une composante muonique faible, elles se développent plus profondément dans l'atmosphère et le signal dans les détecteurs de particules éloignés du cœur de la gerbe dure plus longtemps. Plusieurs approches sont explorées pour identifier les gerbes de photons dans la collaboration Pierre Auger. Utilisant deux observables qui quantifient les différences de développement des gerbes combinées dans une analyse multi-variée, l'analyse officielle utilisant uniquement les données du SD a été entièrement revue au sein du groupe, pour permettre la publication des résultats.

Une approche différente a été développée par Julien Souchard dans le cadre de sa thèse. Elle consiste à combiner des observables discriminantes construites en estimant la part de signal venant de la composante muonique, et de la composante électromagnétique. Les variables sont utilisées dans une analyse de type machine-learning conçue pour être évolutive. Cette étude a constitué le cœur d'un travail de thèse soutenue en octobre 2020. Enfin, dans une optique de préparation d'analyses pour AugerPrime, un travail de thèse débuté en 2020 exploite, pour rechercher les photons UHE, l'universalité des gerbes^[5] : les propriétés moyennes du développement des gerbes peuvent être décrites à l'aide de leurs caractéristiques macroscopiques. Ce principe permet d'établir des modèles prédisant la forme et l'intensité des signaux reçus par les détecteurs au sol, modèles qui servent ensuite à reconstruire les caractéristiques du rayon cosmique primaire en comparant la prédiction aux signaux mesurés. Cette approche est utilisée pour identifier les gerbes de photons parmi l'ensemble des gerbes hadroniques. Les premières étapes de validation de la méthode, et de reconstruction ont été réalisées.

Production de photons par les RCUHE dans la galaxie

Le groupe a également contribué à estimer le flux de photons UHE produits par l'interaction des RCUHE avec le gaz contenu dans la galaxie. Pour ce faire, 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 photons dans ces interactions, ces deux derniers paramètres étant déterminés grâce à des simulations d'interactions de 10^{15} à 10^{20} eV. L'étude a permis de quantifier le flux de photons résultant de ces interactions, et l'article présentant les résultats de l'étude a été soumis^[2].

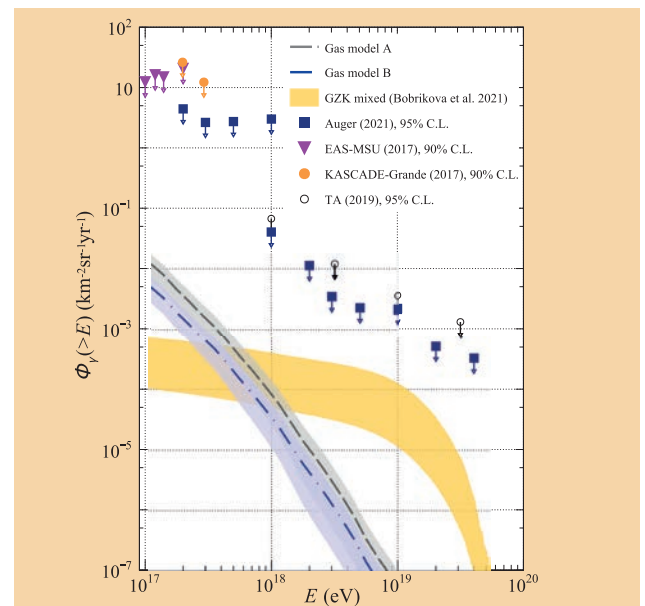


Figure 2. Flux de photons UHE en fonction de l'énergie [2].

Les flux évalués en considérant la production de photons UHE par les interactions des RCUHE avec les nuages de gaz dans la galaxie sont représentés par les lignes pointillées grises (correspondants à 2 modèles de densité d'hydrogène et d'hélium dans la galaxie). Le flux estimé de photons résultant de l'interaction des RCUHE avec le CMB lors de leur propagation est représenté par la bande jaune dans l'hypothèse d'un scénario d'un flux de RCUHE composé de différents type de noyaux. Les limites sur les flux de photons déterminées par différentes expériences sont indiqués par différents marqueurs. Les carrés noirs présentent les limites obtenues par différentes analyses et lots de données de l'Observatoire Pierre Auger, et à plus haute énergie, celles obtenues grâce à une analyse multivariée appliquée aux données collectées par le réseau de surface.

Projet MICRO

Une partie du groupe Auger participe au projet MICRO dont l'objectif est d'apporter une contribution originale pour répondre à la question de l'identification des sources de RCUHE, en étudiant 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. Les contributions de l'équipe se focalisent sur les observables de masse qui peuvent être développées à partir des données de détecteurs au sol.

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *Search for cosmogenics photons in the ultra high energy cosmic ray flux*, Julien Souchard, thèse de l'Université Grenoble Alpes, spécialité : Physique Subatomique et Astroparticules, Octobre 2020.

Principales publications

1. *Multi-Messenger Physics with the Pierre Auger Observatory*, Front. Astron. Space Sci. 6 (2019), <https://arxiv.org/abs/1904.11918>
2. *Diffuse flux of ultra-high energy photons from cosmic-ray interactions in the disk of the Galaxy and implications for the search for decaying super-heavy dark matter*, Corinne Bérat et al 2022 ApJ 929 55, <https://arxiv.org/abs/2203.08751>
3. *Operations of the Pierre Auger Observatory*, Rossella Caruso, on behalf of the Pierre Auger Collaboration, <https://pos.sissa.it/395/238/pdf>.
4. *The upgrade of the Pierre Auger Observatory with the Scintillator Surface Detector*, Gabriella Cataldi, on behalf of the Pierre Auger Collaboration, <https://pos.sissa.it/395/251/pdf>.
5. *A search for ultra-high-energy photons at the Pierre Auger Observatory exploiting air-shower universality*, Pierpaolo Savina, on behalf of the Pierre Auger Collaboration, <https://pos.sissa.it/395/373/pdf>

Ressources Web

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

ÉQUIPE COSMOLOGIE MULTI-LONGUEURS D'ONDE

L'engagement de l'équipe Cosmologie multi-longueurs d'onde (COSMO-ML) dans de grands projets de cosmologie a débuté il y a deux décennies avec le ballon Archeops puis le satellite Planck. Cela a concerné les analyses du fond diffus cosmologique (CMB) en température et en polarisation, la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB, ainsi que la cosmologie avec des amas. Cette implication est toujours d'actualité avec un rôle majeur dans les expériences NIKA2, CONCERTO et Euclid et avec une participation active à la préparation d'une nouvelle génération d'instruments tels que les projets Litebird et CMB-S4. Nos activités couvrent toute la gamme des activités liées à la cosmologie : la conception, la fabrication et le commissioning des instruments, l'analyse des données et leur exploitation cosmologique.

Équipe de recherche : membres permanents

Andrea Catalano, Juan Francisco Macías-Pérez, (responsable d'équipe jusqu'en 2022).
Frédéric Mayet, Laurence Perotto.

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Emmanuel Artis, post-doctorant. Corentin Hanser, doctorant. Alejandro Jiménez Muñoz, doctorant.
Florian Kéruzoré, doctorant. Miren Muñoz-Echeverría, doctorante.

Personnels des services techniques

Service Électronique : Julien Bounmy, Olivier Bourrion, Christophe Hoarau, Damien Tourres.
Service Détecteurs et Instrumentation : Julien Marpaud, Marc Marton.
Service Mécanique : Romain Bourroux, Mile Kusulja, Sébastien Roudier, Francis Vezzu.
Service Informatique : Nora Achbak, Jérôme Fulachier), Fabian Lambert, Jérôme Odier.

Introduction

L'équipe COSMO-ML est impliquée de longue date sur la thématique de la cosmologie observationnelle et instrumentale. Depuis la participation à la construction et l'analyse de données du ballon Archeops en 1998, puis du satellite Planck à partir des années 2000, l'équipe a toujours eu comme idée directrice de s'impliquer à toutes les étapes de projets cosmologiques majeurs. L'activité de l'équipe 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. En particulier, l'équipe a acquis une expertise dans le développement d'instruments utilisant la technologie KID (Kinetic Inductance Detectors), dans le cadre d'une synergie grenobloise sur cette activité, concrétisée récemment par la création du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) KIDs.

L'analyse de données constitue le deuxième volet, avec le développement de pipelines d'analyse, l'étalonnage et le *commissioning* des détecteurs et des caméras. Cette activité amène les membres de l'équipe à jouer des rôles majeurs dans des collaborations internationales (Planck, NIKA2, Concerto, ...). L'analyse des données provenant de ces détecteurs constitue en effet un point clef pour le contrôle des effets systématiques nécessaire à l'exploitation scientifique.

Finalement, le troisième volet porte sur l'obtention des résultats cosmologiques. Au cours des années, l'équipe a contribué de manière significative aux résultats des analyses du fond diffus cosmologique (CMB) en température et en polarisation, la reconstruction de l'effet de lentille gravitationnelle sur le CMB, ainsi que la cosmologie avec des amas. En particulier, l'équipe COSMO-ML porte le grand projet SZ de la collaboration NIKA2 dont l'objectif est de faire entrer la cosmologie avec des amas dans l'ère de précision.

NIKA2

NIKA2 est une caméra cryogénique millimétrique, opérant à 150 et 260 GHz et comportant 2900 KID refroidis à 100 mK, qui est installée au télescope de 30 mètres de l'IRAM. Elle a été construite par une collaboration internationale dont le LPSC est membre fondateur. L'équipe COSMO-ML a joué un rôle majeur dans le développement, la construction et le *commissioning* de la caméra NIKA2 [7]. Elle est

également responsable du Grand Programme d'observation SZ et assume des responsabilités importantes au sein de la collaboration.

Le Grand Programme d'observation SZ bénéficie de 300 heures d'observation accordées par l'IRAM dans le cadre du temps garanti attribué à la collaboration NIKA2. Ce programme international de recherche comporte 10 laboratoires participants (IN2P3, INSU, CEA, Rome, Madrid, Tenerife). L'objectif scientifique est d'étalonner en masse un échantillon représentatif constitué de 50 amas de galaxies sélectionnés en SZ (catalogues Planck et ACT) à un décalage vers le rouge moyen à élevé ($0,5 < z < 0,9$) et couvrant un ordre de grandeur en masse. Ces observations permettront de mener une étude complète de leur morphologie et de leur évolution. De plus, ces données sont combinées aux données X du satellite XMM-Newton afin d'étudier les profils thermodynamiques radiaux (densité, pression, masse, température, entropie). Ces derniers sont essentiels pour une compréhension complète de la relation observable-masse des amas de galaxies qui permettra in fine d'exploiter les grands relevés d'amas pour contraindre la cosmologie. À ce jour, plus de la moitié des amas a été observée. Les premières publications ont permis de montrer l'importance de l'état de perturbation [8] et la présence de sources ponctuelles [6] dans l'estimation de la masse des amas (figure 1).

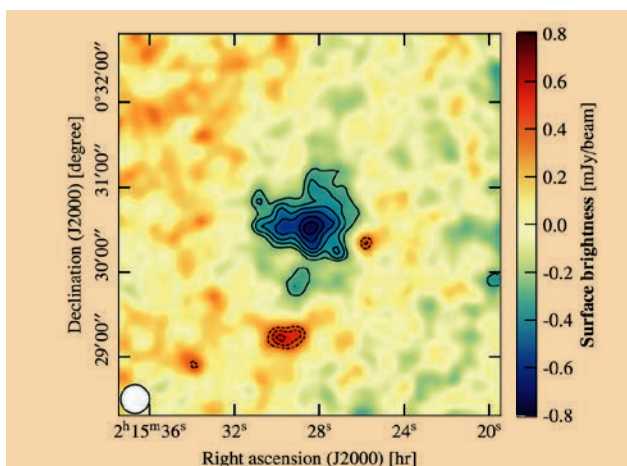


Figure 1 : Carte NIKA2 à 150 GHz de l'amas ACT-CLJ0215.
(Figure extraite de F. Kéruzoré et al. (2020) [6].

On observe le décrétement caractéristique de l'effet SZ à cette fréquence. L'excellente résolution angulaire permet d'obtenir des informations de première utilité pour la cosmologie avec des amas.

Concerto et KISS

L'équipe COSMO-ML du LPSC a été moteur dans le développement de spectro-imageurs millimétriques à grand champs de vue à base de matrices de KIDS et équipés avec une technologie de type interférométrie Martin-Pupplet (MPI en anglais). Tout d'abord le prototype KISS, conçu et développé par le LPSC en collaboration avec l'Institut Néel a été installé et utilisé avec succès pendant deux ans au télescope QUIJOTE à l'observatoire du Teide à Tenerife. KISS a permis de développer l'ensemble de la technologie ainsi que les outils de traitement et d'analyse de données et son exploitation scientifique [2]. L'instrument CONCERTO [3] (CarbON CII line in post-rEionisation and ReionisaTiOn), installé au télescope APEX à 5000 m au Chili a été construit grâce à une "ERC senior grant" accordée à G. Lagache (basée au LAM). L'instrument a été conçu et construit par une collaboration entre le GIS KIDS et le LAM, avec une très forte contribution des services techniques du LPSC (électronique, mécanique et SDI). CONCERTO utilise 4000 détecteurs (plan focal de 18,6 minutes d'arc de diamètre) dans le domaine spectral de 130 à 310 GHz, et avec une résolution jusqu'à 1.8 GHz. Les objectifs principaux de CONCERTO sont :

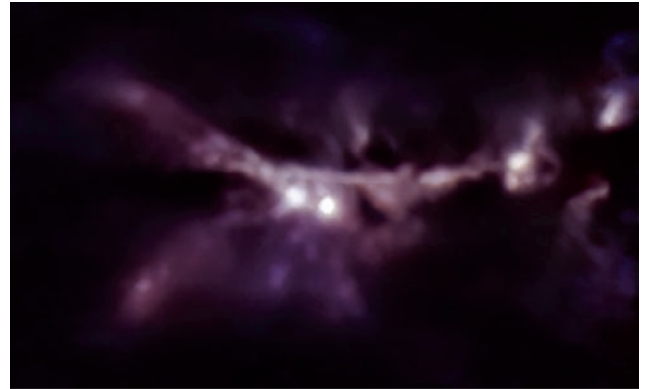


Figure 2 : Première lumière de CONCERTO. (Figure extraite de ESO/CONCERTO collaboration <https://www.eso.org/public/unitedkingdom/announcements/ann21010/?lang=fr>, voir CONCERTO collaboration : Catalano et al., EPJWC 257 (2021)).

Image composite de la région de formation d'étoiles NGC6334 (Cat Paw Nebula) sur une région de 37x25 arcmin² pour un temps total d'intégration de 16 minutes. Il s'agit des données en photométrie base fréquence (bleu) et haute fréquence (rouge).

- 1) la cartographie des fluctuations de la raie de CII afin d'étudier l'époque de ré-ionisation, et
- 2) l'étude de la masse et température des amas de galaxies via l'effet SZ. CONCERTO a été installé avec succès en avril 2021 et des campagnes d'observations scientifiques sont prévues jusqu'à décembre 2022. Les premières lumières (figure 2) et la *commissioning* de l'instrument ont démontré des performances instrumentales au niveau attendu. L'équipe LPSC est responsable de la science amas de galaxies.

Euclid

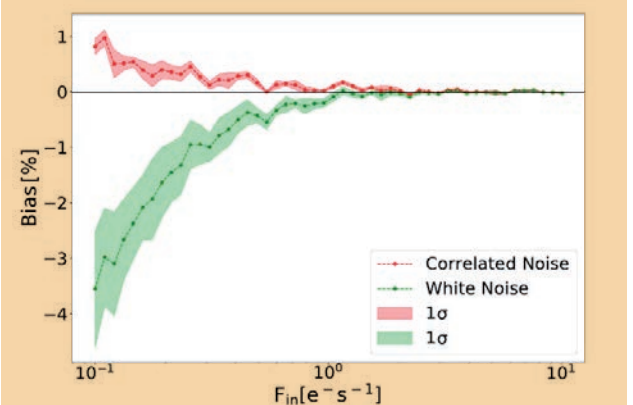
Le satellite EUCLID sera l'un des instruments phares pour la cosmologie dans les prochaines années. Il sera lancé par l'ESA en 2023 et opéré depuis le point L2 de Lagrange à 1.5 millions de kilomètres. Il observera le ciel avec deux instruments nommées VIS (caméra photométrique visible) et NISP (caméra photométrique et spectromètre dans l'infrarouge). EUCLID produira un relevé sans précédents des galaxies lointaines dans notre Univers pour l'étude de l'énergie et la matière noire. Ceci permettra une mesure précise des paramètres cosmologiques via des sondes telles que la distribution spatiale des galaxies, l'effet de lentille gravitationnelle, le comptage et la distribution spatiale des amas de galaxies.

L'équipe COSMO-ML a joué un rôle important dans le développement de l'instrument NISP en assumant la responsabilité de la réalisation des tests EMC des

détecteurs réalisés chez Airbus et en réalisant l'étude des caractéristiques du bruit et de sa relation avec l'estimation du flux des sources en vol, (figure 3).

Figure 3 : Estimation du biais attendu dans le flux mesuré en vol par l'instrument NISP d'EUCLID. (Figure extraite de Jiménez-Muñoz et al (2021) [1]).

Ce biais est dû au bruit coloré corrélé dans les détecteurs. Deux cas sont étudiés : 1) s'il n'est pas pris en compte par la chaîne d'analyse (vert), comme c'est le cas par défaut, et 2) s'il pris en compte avec l'algorithme développé au LPSC (rouge). Nous avons pu démontrer que, pour les conditions de vol d'EUCLID, l'algorithme embarqué est suffisant.



En outre, l'équipe a pris en charge la fabrication de masques du ciel au sein du *Science Ground Segment* (SGS) et de la livraison des données internes. Ces masques sont essentiels pour l'exploitation cosmologique de l'instrument car ils définissent pour chaque point du ciel la probabilité de détecter une galaxie. Ces travaux ont bénéficié d'une implication majeure des services techniques du laboratoire

(mécanique, électronique, SDI et informatique). Enfin, l'équipe participe aussi à l'exploitation cosmologique de l'instrument et notamment aux efforts pour la détermination de la fonction de sélection dans le cadre de la détection des amas de galaxies. Cette fonction de sélection est fondamentale pour l'obtention de résultats cosmologiques par comptage des amas des galaxies.

LiteBird

LiteBIRD est une mission satellite stratégique de classe L de la JAXA avec un lancement prévu avant 2030 et un fonctionnement pour une durée de 3 ans au point de Lagrange L2. LiteBIRD cartographiera tout le ciel avec 3 instruments en 15 bandes de fréquences entre 34 et 448 GHz avec une sensibilité de $2,2 \mu\text{K-arcmin}$ et une résolution angulaire de $0,5$ degré à 100 GHz. LiteBIRD sera principalement dédié à la mesure des

modes B en polarisation du CMB pour l'étude de l'inflation dans l'Univers primordial. L'équipe du LPSC participe activement à LiteBIRD aussi bien du point de vue instrumental que cosmologique. Nous sommes responsables du banc de tests qui permettra la caractérisation en fréquence et en polarisation des détecteurs qui équipent les instruments opérant à moyennes et hautes fréquences, sous responsabilité européenne. En outre, nous participons à la préparation de l'analyse des données de vol. Nous sommes aussi membres du comité de pilotage de l'instrument et de *l'editorial board*.

Instrumentation

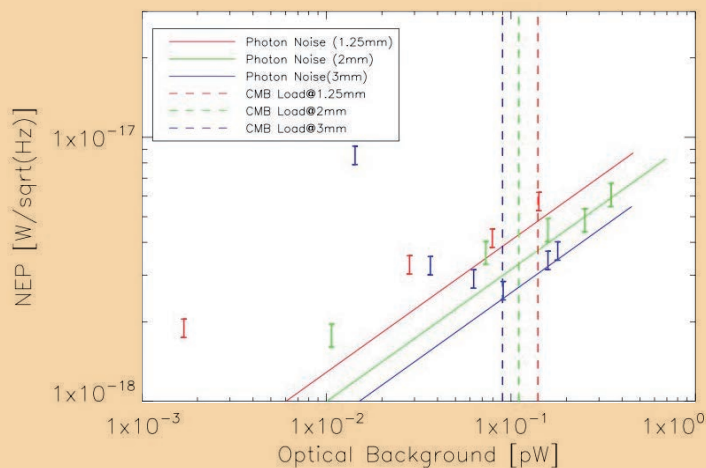


Figure 4 : Mesures de sensibilité (exprimées en Noise Equivalent Power - NEP). (Figure extraite de Catalano et al. 2020 [4]).

Pour cinq matrices prototypes de centaines de KID optimisées pour des mesures dans un environnement spatial. Chaque matrice observe dans une bande électromagnétique différente centrées aux longueurs d'onde 1, 2 et 3 mm. Chaque point est une mesure de sensibilité pour différentes charges optiques. Les lignes pointillées verticales représentent le fond optique typique attendu d'un instrument réel fonctionnant au deuxième point de Lagrange du système Soleil - Terre (choisi par le satellite Planck et l'orbite cible pour les expériences spatiales de prochaine génération). Les résultats indiquent que les NEP mesurées sont conformes à la limite du bruit de photons pour des charges typiques des observations spatiales.

L'équipe COSMO-ML du LPSC est moteur dans le développement de la nouvelle génération de détecteurs cryogéniques KID, leur validation photométrique, leur électronique de lecture, leur étalonnage scientifique ainsi que l'instrumentation annexe. En particulier, notre équipe joue un rôle clef dans le développement de l'électronique de lecture des détecteurs, le design et la fabrication de l'optique de reprise, les mesures de caractérisation (figure 4) et le développement des logiciels d'acquisition. En 2021, nous avons renforcé les activités du GIS KID en équipant un nouveau laboratoire millimétrique au LPSC qui a été installé dans le hall projet du laboratoire et fonctionne en parallèle de celui déjà en fonctionnement à l'Institut Néel. Dans ce laboratoire, nous concentrons nos activités autour de 3 axes :

- développement d'une nouvelle génération d'électronique,
- mesures de caractérisation des matrices des KID pour le spatial,
- R&D antireflet optique : mesures à froid sur les échantillons d'anti-reflets produits par l'atelier du LPSC.

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *Cosmologie à partir des observations Sunyaev-Zeldovich d'amas de galaxies avec NIKA2*, F. Kéruzoré, thèse de l'Université Grenoble Alpes, sept. 2021, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03555821>
- *Preparation for the analysis and interpretation of Euclid galaxy clusters*, A. Jiménez Muñoz, thèse de l'Université Grenoble Alpes, nov. 2021, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03579174>
- *Les performances et le programme cosmologique de la caméra NIKA2*, L. Perotto, HDR de l'Université Grenoble Alpes, juin 2020, <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03085279>

Principales publications

1. *Euclid: Estimation of the Impact of Correlated Readout Noise for Flux Measurements with the Euclid NISP Instrument*, A. Jiménez Muñoz et al., *PASP* 133 (2021) 094502, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03355824/>
2. *Accurate sky signal reconstruction for ground-based spectroscopy with kinetic inductance detectors*, A. Fasano et al., *Astron. and Astrophys.* 656 (2021) A116, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03473434/>
3. *A wide field-of-view low-resolution spectrometer at APEX: Instrument design and scientific forecast*, P. Ade et al., *Astron. and Astrophys.* 642 (2020) A60, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02960787>
4. *Sensitivity of LEKID for space applications between 80 GHz and 600 GHz*, A. Catalano et al., *Astron. and Astrophys.* 641 (2020) A179, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02953126>
5. *EPJ Web of Conferences*, Volume 228, 2020, F. Mayet, A. Catalano, J.F. Macías-Pérez and L. Perotto (Eds.), *EDP Sciences, Proc. mm Universe @ NIKA2 - Observing the mm Universe with the NIKA2 Camera*, <https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2020/04/contents/contents.html>
6. *Exploiting NIKA2 SZ/XMM-Newton imaging synergy for low mass, high-z galaxy clusters within the NIKA2 SZ Large Program. Observations of ACT-CL J0215.4+0030 at z~0.9*, F. Kéruzoré et al., *Astron. and Astrophys.* 644 (2020) A93, <https://arxiv.org/abs/2009.02563>
7. *Calibration and performance of the NIKA2 camera at the IRAM 30-m telescope*, L. Perotto et al., *Astron. and Astrophys.* 637 (2020) A71, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02362609/>
8. *Impact of the mean pressure profile of galaxy clusters on the cosmological parameters estimated from the Planck tSZ power spectrum*, F. Ruppen et al., *MNRAS* 490 (2019) 784, <https://arxiv.org/abs/1905.05129>

Ressources Web

- Collaboration NIKA2 : <https://ipag.osug.fr/~ponthien/NIKA2/Welcome.html>
- Collaboration Concerto : <https://mission.lam.fr/concerto/pages/collaboration.html>
- Collaboration Euclid : <https://www.euclid-ec.org/>
- Euclid-France : <https://euclid-france.fr/>
- Collaboration Litebird : <https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/future/litebird.html>

ÉQUIPE DARK

L'équipe s'intéresse à (I) la cosmologie observationnelle, via le relevé "Legacy Survey of Space and Time" (LSST) qui débutera à l'Observatoire Vera C. Rubin (Chili) en 2024, avec un intérêt particulier pour les sondes *amas de galaxies et cisaillement gravitationnel* ; (II) l'étude des sursauts gamma orphelins et leur recherche dans LSST comme événements transitoires, via des contributions au développement du "broker" d'alertes FINK ; (III) la recherche indirecte de matière noire en gamma (phénoménologie) et dans le rayonnement cosmique galactique (expérience AMS-02 sur la station spatiale internationale).

Équipe de recherche : membres permanents

Johan Bregeon, Céline Combet, Laurent Derome, Cyrille Doux, Marine Kuna, David Maurin (responsable d'équipe depuis 2021), Cécile Renault (responsable d'équipe 2019-2021)

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Constantin Payerne (doctorant), Calum Murray (post-doctorant), Nathanael Weinrich (masterarbeit)

Personnels des services techniques

Guillaume Dargaud, Frédéric Melot (Service Informatique), Pierre de Lamberterie, Marc Marton (Service Détecteurs et Instrumentation), Valérie Favre, Françoise Petiot (Service Administrations et Finances), Mile Kusulja, Francis Vezzu (Service Études et Réalisations Mécaniques), Éric Lagorio, Emmanuel Tourba (Service Électronique), Myriam Migliore (Pôle Accélérateurs et Source d'Ions)

Observatoire Rubin, relevé LSST et énergie noire

La cosmologie observationnelle, et en particulier les observations de supernovae lointaines, a montré que l'Univers était 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 inconnue. Pour mieux comprendre la nature de cette énergie noire et l'ensemble du modèle cosmologique, le "Legacy Survey of Space and Time" (LSST), qui sera mené à l'Observatoire Vera C. Rubin, va permettre de tracer l'histoire de l'expansion de l'Univers, via un certain nombre de sondes cosmologiques. Ce télescope de 8 m de diamètre situé dans le désert d'Atacama, au Chili, va observer un tiers du ciel, deux à trois fois par semaine, pendant dix ans, et détectera des centaines de milliers de supernovae et des milliards de galaxies. La "Dark Energy Science Collaboration" (DESC) coordonne l'exploitation cosmologique des données du LSST.



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.

Chargeur de filtre et bancs de calibration de la caméra pour le projet Rubin

Avec plus de trois milliards de pixels, la caméra placée au foyer du télescope de l'observatoire Vera C. Rubin est la plus grande caméra CCD jamais construite. En plus des CCD du plan focal, la caméra intégrée possède trois lentilles permettant la focalisation de la lumière et un système mécanique complexe (l'auto-changeur) permettant de changer le filtre optique placé devant la caméra sans intervention humaine.

L'IN2P3 a eu la charge de fournir le système de changeur de filtres. Les services du LPSC ont contribué à cet effort, en développant le dispositif permettant de transférer les filtres depuis leur boîte de stockage vers l'auto-changeur (opération répétée régulièrement en fonction de la cadence d'observation). Cet équipement a été livré à SLAC, aux États-Unis, en 2021. Pour leurs contributions, E. Lagorio (service électronique) et F. Vezzu (service mécanique) ont été récipiendaires du Cristal collectif du CNRS 2021.

L'équipe DARK a aussi la responsabilité du développement de deux projecteurs (dédiés à la caractérisation de la caméra) ainsi que leurs codes d'analyse (pour leur exploitation scientifique). Le CCOB ("camera calibration optical benches") *faisceau large* ($\varnothing 4$ cm) vise à la mesure de la réponse relative de l'ensemble des CCD du plan focal dans chacune des bandes optiques, avec une précision de l'ordre de 1%. Le CCOB *faisceau fin* ($\varnothing 2$ mm) permet, quant à lui,



Figure 2. Photographie du banc d'étalonnage optique faisceau fin de la caméra du Rubin LSST (crédit : LPSC).

Le banc est composé d'une table de translations de 3 m par 3 m, d'un berceau et d'un pivot au bout duquel est disposé l'élément optique d'émission du faisceau de lumière. Le dispositif permet d'envoyer la lumière en tout point de la caméra sur une vaste gamme d'angles d'incidence.

de mesurer l'alignement du système optique de la caméra (lentilles et filtre), ainsi que la transmission totale de l'optique dans chacune des longueurs d'ondes de l'instrument.

Redshifts photométriques de LSST et échelle BAO

Dans le contexte du futur relevé LSST, l'équipe a quantifié la précision à laquelle pouvait être reconstruite l'échelle BAO (pour "Baryon Acoustic Oscillation"). Cette échelle caractérise la distance maximale sur lesquelles les ondes acoustiques se sont propagées dans l'Univers primordial, avant le découplage. Cette

distance a été initialement mesurée dans le fond diffus cosmologique. Une mesure dans l'Univers récent, via l'agrégation préférentielle des galaxies à cette échelle, permet de donner des informations cruciales sur l'origine de l'expansion accélérée de l'Univers.

Dans Rubin-LSST, la distance (ou redshift z) des galaxies n'est pas directement observable, mais seulement estimée par une reconstruction photométrique basée sur les flux mesurés à travers les différents filtres optiques du télescope. La thèse d'A. Choyer au LPSC (dirigée par J.S. Ricol et C. Renault) a porté sur la précision de cette reconstruction et son impact sur la détermination de l'échelle BAO, menant à une publication ^[1].

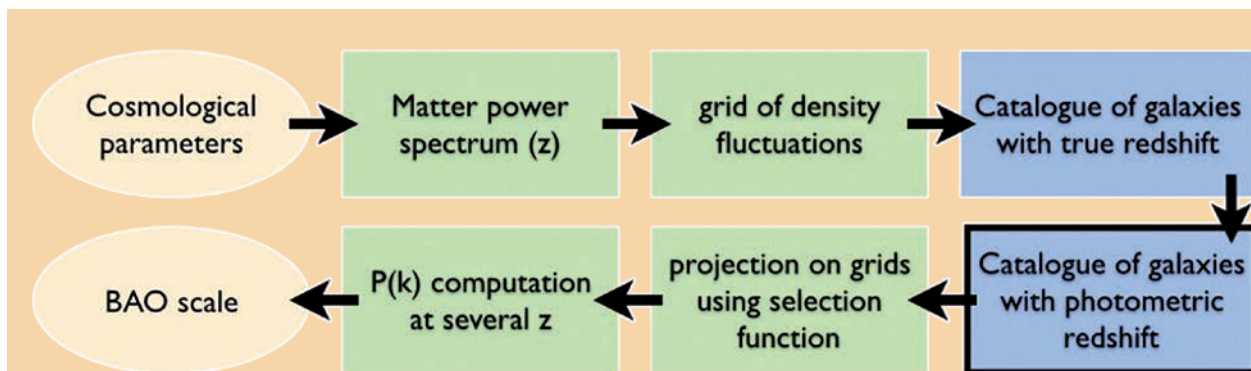


Figure 3. Chaîne d'analyse mise en place pour étudier l'impact des photo-z sur la reconstruction des BAO dans Rubin-LSST. (Figure tirée de [1]).

Partant des paramètres cosmologiques, la génération du spectre de puissance de la matière (puis des fluctuations de densité), permet tout d'abord de générer des catalogues synthétiques de galaxies dont le redshift z est connu, puis leurs photo- z tels qu'ils pourraient être reconstruits par le futur relevé LSST. Ceci a permis de montrer que l'échelle BAO pourrait être reconstruite à une précision du pourcent.

Cosmologie avec les amas de galaxies du LSST

Les amas de galaxies représentent l’ultime étape de formation des structures de l’Univers. La distribution des amas en fonction de la masse et du redshift est donc sensible à la fois 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. Celle-ci n’est pas une quantité observable et, dans le domaine visible couvert par 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) et se traduit par une déformation de l’image des galaxies d’arrière-plan (le cisaillement) et une augmentation de leur brillance (la magnification).

L’équipe DARK travaille à la préparation de l’analyse amas de galaxies au sein de DESC. C. Combet a pris la responsabilité du développement du code CLMM (“Cluster Lensing Mass Modeling”) permettant la reconstruction de la masse grâce au cisaillement, coordonnant le travail d’une quinzaine de membres internationaux de la collaboration [2].

Les données du DESC “Data Challenge 2” (DC2) constituent la référence pour la préparation des analyses. C. Payerne (en thèse dirigée par C. Combet) a mené le projet visant l’exploitation du cisaillement gravitationnel dans le cadre des amas de galaxies de

DC2 et l’étude de ses systématiques. Ce travail a donné lieu à une section dédiée de l’article de validation des données DC2 [3] et à deux notes internes référées (Payerne et al. 2021a,b). Toujours au sein de DESC, l’équipe est également fortement impliquée dans le développement du “pipeline” amas permettant l’estimation des paramètres cosmologiques grâce au comptage d’amas (et dont la reconstruction de la masse n’est qu’une étape).

La magnification est une approche complémentaire pour contraindre la masse des amas. Dans son approche standard, cette analyse est plus bruitée que celle utilisant le cisaillement. En utilisant les données publiques HSC (précurseur de Rubin), C. Murray (postdoc du LabEx ENIGMASS) a travaillé au développement d’une approche novatrice permettant d’utiliser toute l’information spectrale disponible dans l’analyse, gagnant ainsi en précision sur les masses reconstruites.

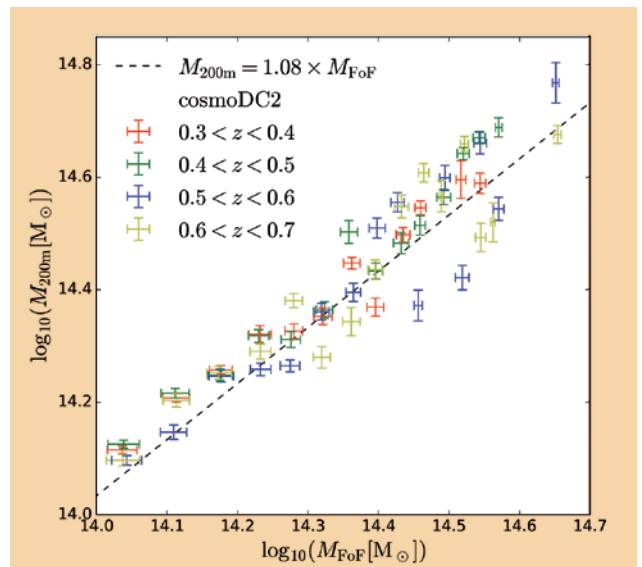


Figure 4. (Figure de C. Payerne publiée dans [3]).

Masse des amas de galaxies de DC2 reconstruits par effet de lentille faible en fonction de la vraie masse.

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

Avec l'arrivée récente dans l'équipe de deux nouveaux membres (M. Kuna en avril 2021 et C. Doux en janvier 2022), l'équipe peut s'intéresser à un ensemble de thématiques plus large, et en particulier à l'étude du cisaillement gravitationnel comme sonde cosmologique¹. Une problématique importante et

¹ Il s'agit ici du cisaillement gravitationnel dû aux galaxies et utilisé directement comme sonde cosmologique, et non du cisaillement induit par les amas et utilisé pour reconstruire leur masse ; la physique sous-jacente reste la même.

commune à l'étude des amas est celle du "blending" 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. Un groupe de travail sur cette problématique existe au sein de la collaboration DESC, coordonné par C. Doux. 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. Il s'agit par exemple d'outils statistiques évolués et de "machine learning", deux aspects mis en œuvre par C. Doux (avant qu'il ne rejoigne l'équipe) dans l'analyse des données du "Dark Energy Survey" (DES), précurseur de Rubin-LSST.

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. Ces objets seront identifiés en caractérisant les différences entre deux images d'une même partie du ciel prises à quelques heures ou jours d'intervalle. Chaque différence conduira à une alerte destinée à la communauté astronomique, pour signifier qu'un phénomène transitoire, et potentiellement d'intérêt, est en cours. Le "broker" d'alertes FINK, développé au sein de l'IN2P3, a été choisi par la communauté Rubin-LSST comme l'un des sept "brokers" officiels qui recevra directement l'ensemble du flux des alertes de l'observatoire.

Parmi les millions d'alertes générées chaque nuit, l'équipe DARK s'intéresse à celles qui pourraient révéler l'existence d'émissions rémanentes en provenance de sursauts gamma orphelins. Les sursauts

gamma comptent parmi les événements les plus violents de l'Univers, et se traduisent par des bouffées très intenses de photons γ (quelques secondes à quelques jours, sur des énergies du keV au TeV). Cette émission gamma est essentiellement due à un jet de particules relativistes extrêmement collimaté et n'est visible que lorsque ce jet pointe en direction de l'observateur. Lorsque ce jet est vu à grand angle, les modèles prévoient que l'émission à plus basse énergie (domaines optiques et radios) soit observable sous la forme de phénomènes transitoires lents et de faible luminosité, baptisés sursaut gamma orphelin.

En 2020, avec l'arrivée de J. Bregeon, l'équipe DARK s'est engagée dans cette thématique, avec des développements de modules spécifiques sursauts orphelins pour FINK. Un financement de thèse a été obtenu par un appel d'offre à l'UGA. Identifier ne serait-ce que l'un de ces sursauts orphelins serait déjà une belle découverte. Si plusieurs dizaines 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.

Analyse des données de l'expérience AMS-02

L'expérience AMS-02 a pour objectif l'étude du rayonnement cosmique galactique (RCG) de la centaine de MeV au TeV. C'est un spectromètre qui a été installé sur la station spatiale internationale (ISS) en mai 2011.

Le cœur d'AMS-02 est constitué d'un aimant permanent (diamètre de 1,114 m et 83 cm de haut) qui courbe les trajectoires des particules chargées. Huit plans de détecteur de traces au silicium permettent de la reconstruire géométriquement. Des détecteurs à scintillation (temps de vol) encadrent l'aimant et signalent le passage d'une particule (et son sens de parcours). Le cylindre intérieur de l'aimant est aussi tapissé de compteurs à scintillation véto, signalant qu'une particule est détruite par collision sur le détecteur (événement à rejeter). Au-dessus du détecteur à temps de vol supérieur se trouve le détecteur à

radiation de transition (TRD) permettant d'identifier électrons et positons. Enfin, en dessous du temps de vol inférieur se trouve un compteur Cherenkov à imagerie annulaire (détecteur RICH, développé au laboratoire dans les années 2000), pour l'identification isotopique des noyaux, et un calorimètre électromagnétique qui absorbe et mesure l'énergie des particules chargées. L'instrument complet, avec une forte redondance des mesures, a de très grandes performances et permet de mesurer les flux de particules de $Z=1-26$, électrons, positons et anti-protons. Ceci permet à AMS-02 de pouvoir apporter des éléments de réponse à des questions astrophysiques, matière noire, et même possiblement sur l'énigme de l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers.

L'expérience AMS a déjà recueilli plus de 180 milliards d'événements. L'équipe du LPSC a été leader de l'analyse de certaines données nucléaires d'AMS-02. Ces dernières ont en effet été choisies pour les publications des flux des éléments de $Z=1-5$ (p, He, Li, Be et B). Ces dernières années, les efforts se sont tournés vers l'analyse isotopique, s'appuyant en partie sur le sous-détecteur RICH. Des résultats préliminaires pour les flux isotopiques du Li, Be, et B ont été présentés à des grandes conférences internationales par L. Derome en 2019 et 2021^[4].

Phénoménologie du rayonnement cosmique

La phénoménologie du RCG s'intéresse à la compréhension des mécanismes de propagation dans la Galaxie. Il s'agit de confronter les modèles aux données, pour en tirer des conclusions sur l'origine des processus astrophysiques sous-jacents, ainsi que la mise au jour des sources ; ces questions ne peuvent être résolues que par une approche à la fois multi-longueur d'ondes (radio, X, γ) et multi-messagers (photons, neutrinos, leptons et noyaux, voire ondes gravitationnelles).

Autour de D. Maurin et en collaboration avec des membres du LAPTh, LAPP et LUPM (dans le cadre du LabEx ENIGMASS et du projet IN2P3

PHENOD), les efforts se sont concentrés sur l'interprétation des mesures de précision d'AMS-02, pour assurer son retour scientifique maximal. De nombreux résultats ont été obtenus, conduisant à une quinzaine de publications dans des journaux de rang A et des "proceedings" de conférences internationales. Parmi ces résultats, nous pouvons mentionner :

- Une amélioration méthodologique de l'analyse des données de l'expérience AMS-02, nécessaire pour ne pas biaiser la détermination des paramètres de transport dans la Galaxie^[5].
- L'analyse combinée des données Li/C, Be/C, B/C, N/O, et $^3\text{He}/^4\text{He}$ d'AMS-02 (contraintes sur les paramètres de transport) et aussi du rapport Be/B (contraintes sur la taille du halo galactique), dans le "Masterarbeit" de N. Weinrich^[6].

Des outils à destination de la communauté ont aussi été rendus public : première version publique du code de propagation USINE^[7] ; mise à jour de la base de données du rayonnement cosmique CRDB^[8].

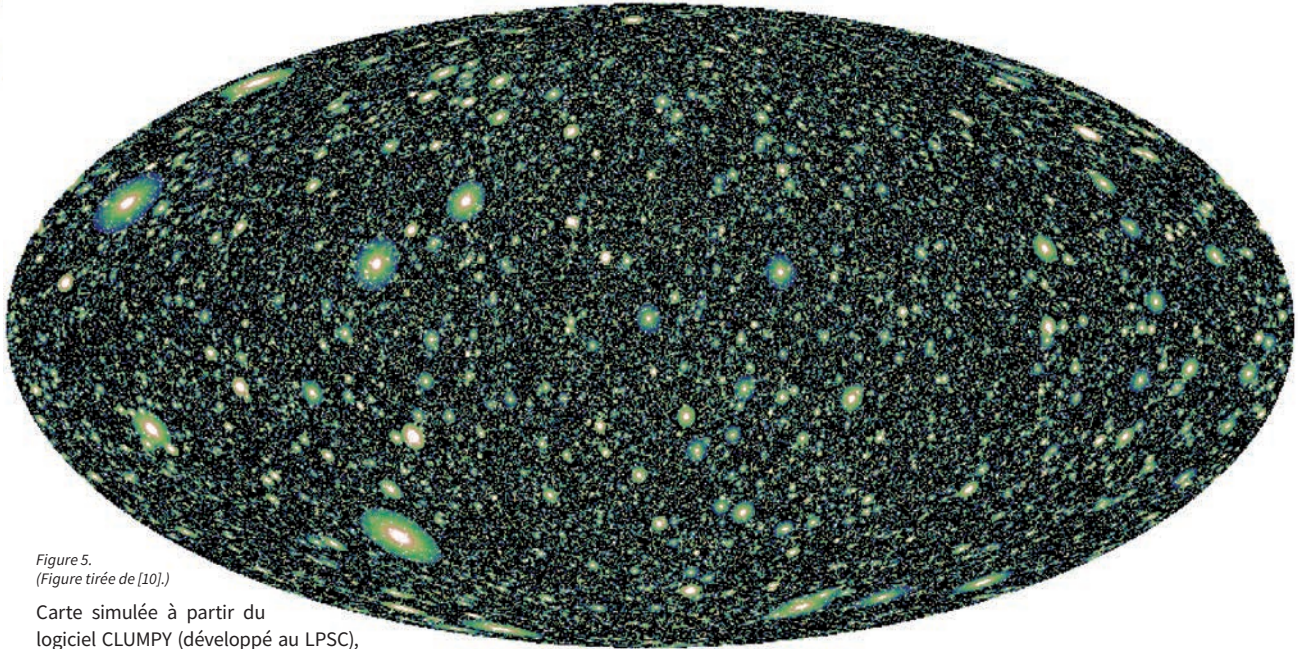
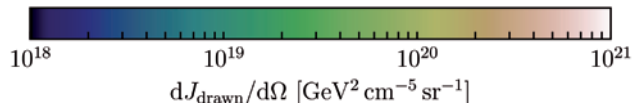


Figure 5.
(Figure tirée de [10].)

Carte simulée à partir du logiciel CLUMPY (développé au LPSC), du signal d'annihilation issu des sous-structures de matière noire dans notre Galaxie. La distribution des objets les plus brillants permet d'étudier les perspectives de détection de halos dits "sombres" (pas d'étoiles dans ces objets) par les détecteurs gamma comme Fermi-LAT ou le futur CTA.



Détection indirecte de matière noire

La matière noire, qui constitue 26 % du contenu de l'Univers, reste une énigme majeure de la physique. Dans le halo sombre de notre Galaxie, cette dernière pourrait se désintégrer ou s'annihiler (en particules standard), conduisant à un excès par rapport aux contributions astrophysiques attendues dans le RCG. Cet excès est recherché dans les flux d'antimatière et du rayonnement γ .

Les meilleures contraintes sur les candidats matière noire sont données par l'étude des anti-protons dans le RCG et par la non-observation de photons γ dans les galaxies naines sphéroïdes (objets qui peuplent la

voie lactée). Sur ce premier aspect, plusieurs publications (en collaboration avec le LAPTh) ont permis de mettre à jour le calcul du fond astrophysique d'anti-protons, afin de tirer de nouvelles contraintes à partir des données d'AMS-02 ^[9]. Sur le second aspect, C. Combet et D. Maurin ont poursuivi leurs efforts pour fournir à la communauté un code de simulation rapide des signaux matière noire en γ et neutrinos : une troisième version du code public CLUMPY a été fournie à la communauté ^[10]. Cette version a permis d'étendre les cibles calculées par le code au domaine extragalactique. En parallèle, une nouvelle caractérisation des signaux issus de l'annihilation de matière dans les halos sombres de la Galaxie a été réalisée (en collaboration avec le LUPM). Cette étude a souligné l'impact fort des forces de marées dans la destruction de ces halos, ce qui affaiblit les contraintes matière noire qui peuvent être tirées de ces objets.

Projet Dirac : outil pour l'utilisation des ressources informatiques distribuées

Dirac est un logiciel libre (sous licence GPL V3) de type "intergiciel" pour gérer des ressources de calcul distribuées (traitement et stockage des données). Il est utilisé par de nombreuses expériences dans lesquelles l'IN2P3 est impliqué, dont CTA, ILC, Belle II, BES et LHCb au CERN. Initié il y a près de 20 ans par l'expérience LHCb, Dirac est constitué depuis 2014 en Consortium qui associe l'ensemble des partenaires contributeurs internationaux. J. Bregeon est responsable technique du projet au niveau de l'IN2P3, et contribue au développement et à la promotion du logiciel auprès des communautés d'utilisateurs^[1].

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *L'astronomie gamma au sol et dans l'espace*. J. Bregeon (HDR, 2019), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02262275v1>

Principales publications (très forte implication de l'équipe)

1. *Impact of photometric redshifts on the galaxy power spectrum and BAO scale in the LSST survey*, Ansari et al., *A&A* 623, 76 (2019), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019A%26A...623A..76A/abstract>
2. *CLMM: a LSST-DESC cluster weak lensing mass modeling library for cosmology*, Aguena et al., *MNRAS* 508, 6092 (2021), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021MNRAS.508.6092A/abstract>
3. *Validating Synthetic Galaxy Catalogs for Dark Energy Science in the LSST Era*, Kovacs et al., *OJAp* 5, 1(2022), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022OJAp....5E...1K/abstract>
4. *Cosmic-Ray Isotopes with the Alpha Magnetic Spectrometer*, Derome et al., *ICRC* (2021), <https://indico.desy.de/event/27991/contributions/101805/>
5. *Fitting B/C cosmic-ray data in the AMS-02 era: a cookbook*, Derome et al., *A&A* 627, 158 (2019), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019A%26A...627A.158D/abstract>
6. *Combined analysis of AMS-02 (Li, Be, B)/C, N/O, ³He, and ⁴He data*, Weinrich et al., *A&A* 639, 131 (2020), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020A%26A...639A.131W/abstract>
7. *USINE: Semi-analytical models for Galactic cosmic-ray propagation*, Maurin, *CPC* 247, 106942 (2020), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020CoPhC.24706942M/abstract>
8. *CRDV v4.0: ultra-high energy, ultra-heavy, and antinuclei cosmic Rays*, Maurin et al., *Universe*, vol. 6, 102 (2020), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020Univ...6..102M/abstract>
9. *AMS-02 antiprotons' consistency with a secondary astrophysical origin*, Boudaud et al., *PRR* 2, 023022 (2020), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020PhRvR...2b3022B/abstract>
10. *CLUMPY v3: γ -ray and ν signals from dark matter at all scales*, Hütten et al., *CPC* 235, 336 (2019), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019CoPhC.235..336H/abstract>
11. *A DIRAC-based Prototype for the Cherenkov Telescope Array Data Management, Processing and Simulations*, Arrabito et Bregeon, *ASPC* 527, 339 (2020), <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ASPC..527..339A/abstract>

Ressources Web

- LSST France (<https://www.lsst.fr/>)
- Collaboration DESC (<https://lsstdesc.org/>)
- Broker d'alertes FINK (<https://www.fink-broker.org/>)
- Expérience AMS-02 (<https://ams02.space/>)
- Intergiciel DIRAC (<https://dirac.readthedocs.io/en/latest/>)

Outils publics (développés par les membres de l'équipe)

- Masse des amas reconstruite par cisaillement gravitationnel (CLMM) <https://github.com/LSSTDESC/CLMM>
- Base de données du rayonnement cosmique (CRDB) <https://lpsc.in2p3.fr/crdb>
- Code de propagation du rayonnement cosmique (USINE) <https://lpsc.in2p3.fr/usine>
- Code de calcul des flux γ et neutrinos matière noire (CLUMPY) <https://lpsc.in2p3.fr/clumpy>

ÉQUIPE MATIÈRE NOIRE (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 dispersion 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'événement 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}F , ^{12}C , ^1H , ^4He .

Équipe de recherche : membres permanents

Daniel Santos (resp.), Fabrice Naraghi, Olivier Guillaudin, Ali Dastgheibi Fard

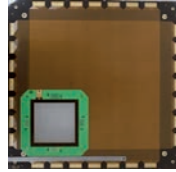
Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Marine Hervé (doctorant, 2018-2021), Cyprien Beaufort (doctorant, 2019-2022)

Personnels des services techniques

Nadine Sauzet, Jean-Francois Muraz (service détecteurs & instrumentation)
Germain Bosson, Joël Bouvier, Jean-Luc Bouly, Laurent Gallin-Martel, Fatah Rarbi (service électronique)
Thierry Descombes (service informatique)
Michel Zampalo (jusqu'à 12/2020, service Ultra-Basse radioactivité)

Le détecteur de 35 x 35 cm² et sa nouvelle carte électronique 1792 voies



Le labex Enigmass a financé les développements d'un nouveau détecteur bas bruit de 35 x 35 cm² et d'une nouvelle carte électronique associée de 1792 voies (voir figure 1), qui permettront de proposer un grand volume actif pour la détection directionnelle. Ces développements ont été réalisés en étroite collaboration par les services SDI et Électronique.

Figure 1 - (crédit Olivier Guillaudin, LPSC).

Le nouveau détecteur en kapton de 35 x 35 cm, "bas bruit", comparé à celui en PCB de 10 x 10 cm².

La détection directionnelle et le sens des traces des reculs ("head-tail") de MIMAC dans la plage du keV

Beaufort et al. (2022)^[4] décrit la contribution des électrons et des ions lors de la formation du signal dans un détecteur Micromegas à grand espace d'avalanche. Ce travail présente comment cette déconvolution peut être utilisée pour la directionnalité en reconstruisant, pour la première fois, des spectres neutroniques mono-énergétiques de 27 keV et de 8 keV, avec une résolution angulaire meilleure que 15°.

Le projet NEWS-G (New Experiments With Sphere-Gas)

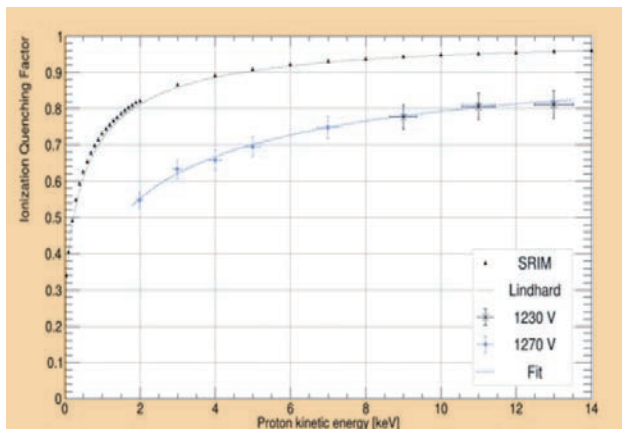


Figure 2 - (crédit Cyprien Beaufort, LPSC).

La courbe du quenching en ionisation des protons dans le méthane (CH₄) à 100 mbar mesurée au LPSC.

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 senseur 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 NEWS-G, l'équipe du laboratoire a la responsabilité de la mesure du facteur de *quenching* en ionisation jusqu'à très basse énergie (~100 eV) et ce grâce notamment aux possibilités offertes par notre ligne COMIMAC. Les mesures réalisées couvrent plusieurs noyaux cibles (⁴He, ¹H, ²⁰Ne, ¹⁹F). Au cours de ces 4 dernières années, plusieurs campagnes de mesures des facteurs de *quenching*, notamment dans le mélange gazeux ²⁰Ne + 0,7% CH₄ et dans le CH₄ pur, ont été réalisées, voir figure 2.

Avant d'être installée au SNOLAB, la sphère de 140 cm de diamètre a été montée au laboratoire souterrain de Modane (LSM) pour des tests, qui ont permis de réaliser une mesure dans le méthane à 135 mbar qui sera l'objet d'une publication.

La spectroscopie neutronique avec MIMAC-FastN

L'équipe MIMAC du LPSC a adapté une chambre MIMAC à la détection neutronique, et a développé

un spectromètre mobile et directionnel de neutrons rapides, MIMac-FastN, qui a une très large gamme d'énergie neutronique (10 keV - 600 MeV) avec différents mélanges de gaz et pressions. Dans Sauzet et al. (2020) [2], nous présentons ses principales caractéristiques et fonctionnalités et démontrons son potentiel dans la gamme d'énergie de 1 MeV à 15 MeV par une mesure faite sur l'Installation GENESIS du LPSC, une source de neutrons basée sur accélérateur.

Axions solaires de Kaluza-Klein en dimensions supplémentaires

L'axion pourrait être utilisé comme sonde pour des dimensions supplémentaires. Dans de grandes dimensions supplémentaires, outre l'axion QCD, on obtient une "tour" infinie d'états massifs de Kaluza-Klein (KK). Nous avons décrit les processus de production des axions KK dans le Soleil via le couplage axion-photon, $g_{a\gamma\gamma}$, et nous dérivons la densité numérique des axions KK qui sont piégés dans le champ de gravitation solaire et qui s'y accumulent au fil des temps cosmiques. Les recherches actuelles d'axions KK utilisent le canal de désintégration, $a \rightarrow \gamma\gamma$, pour lequel nous révisons l'estimation

du taux d'événements à détecter sur Terre. Le modèle révisé reste une explication viable et attrayante pour de multiples observations astrophysiques (voir figure 3) et nous proposons plusieurs approches pour rechercher des KK axions dans un futur proche.

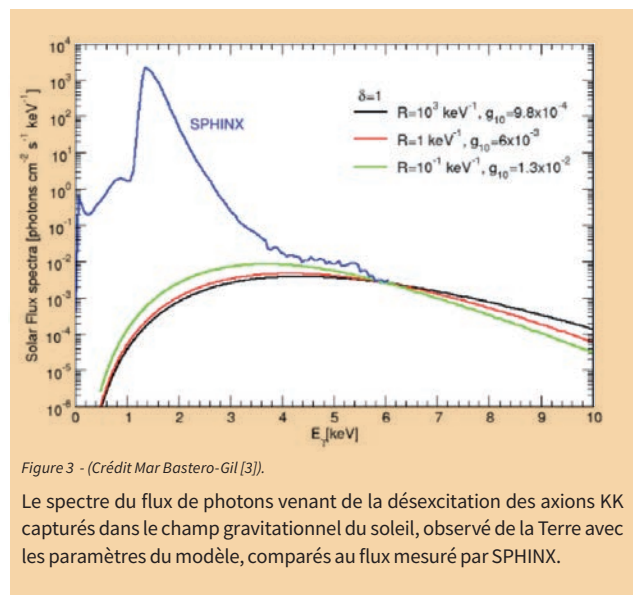


Figure 3 - (Crédit Mar Bastero-Gil [3]).

Le spectre du flux de photons venant de la désintégration des axions KK capturés dans le champ gravitationnel du soleil, observé de la Terre avec les paramètres du modèle, comparés au flux mesuré par SPHINX.

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *Directional Dark Matter detection with MIMAC*, Yi Tao, Décembre 2020, Tsinghao University (Beijing). Dir Charling Tao (CPPM)

Principales publications

1. *Dark Matter Directionality Detection performance of the Micromegas-based μ TPC- MIMAC detector*, Y. Tao, C. Beaufort, I. Moric, C. Tao, D. Santos, N. Sauzet, C. Couturier, O. Guillaudin, J. F. Muraz, F. Naraghi, N. Zhou, J. Busto (NIMA (2020), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016890022100396X>)
2. *Fast neutron spectroscopy from 1 MeV up to 15 MeV with MIMAC-FASTn, a mobile and directional fast neutron spectrometer*, N. Sauzet, et al., Nucl.Inst.Methods A (2020), <https://arxiv.org/abs/1906.03878>
3. *Solar axions in large extra dimensions*, Mar Bastero-Gil, Cyprien Beaufort, Daniel Santos, JCAP 2021, arXiv:2107.13337, <https://arxiv.org/abs/2107.13337>
4. *Directionality and head-tail recognition in the keV-range with the MIMAC detector by deconvolution of the ionic signal*, C. Beaufort, O. Guillaudin, J.-F. Muraz, N. Sauzet, D. Santos, R. Babut, JCAP, Vol. 2022, Issue 08, id.057

ÉQUIPE NEUTRINO

L'équipe NEUTRINO est impliquée depuis 2013 dans l'étude de l'anomalie des neutrinos de réacteurs (RAA) 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 à l'automne 2020 et l'équipe s'est engagée dans deux nouveaux projets d'étude des propriétés fondamentales des neutrinos : le projet RICOCHET de mesure précise de la diffusion cohérente de neutrino auprès du réacteur de l'ILL afin de tester la physique au-delà du modèle standard, et le projet à long terme DUNE utilisant un faisceau de neutrinos produits par un accélérateur pour des mesures de précisions des oscillations des neutrinos à longue distance.

Équipe de recherche : membres permanents

Corinne Goy, Jacob Lamblin, Jean-Sébastien Réal,
Jean-Stéphane Ricol, Arnaud Robert, Anne Stutz (responsable d'équipe)

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Guillaume Chemin (doctorant), Joël Dai (doctorant), Thomas Kosc (post-doc),
Matthieu Licciardi (post-doc), Mathieu Vialat (doctorant)

Personnels des services techniques

Éric Perbet, Francis Vezzu, (Service Études et Réalisations Mécaniques), Mohammed Chalât, Murielle Heusch,
Jean-François Muraz, Clément Thomasse (Service Détecteur et Instrumentation), Olivier Bourrion, Éric Lagorio,
Fatah Rarbi (Service Électronique)

STEREO : des neutrinos stériles aux neutrons cachés

Le détecteur STEREO a été installé en 2016 à proximité du réacteur de l'ILL à Grenoble. L'expérience est optimisée pour une bonne sensibilité aux oscillations d'antineutrinos de quelques mètres de longueur d'onde induites par un mélange avec un éventuel neutrino stérile de masse d'environ 1 eV. Une distorsion du spectre en énergie des antineutrinos dépendant de la distance au réacteur est alors attendue. Le détecteur STEREO, segmenté en six cellules identiques permet d'exploiter ce phénomène (figure 1) en comparant les six spectres mesurés, indépendamment de toute prédiction sur le spectre émis.

Les antineutrinos sont détectés via la désintégration bêta inverse (IBD) décrite par : $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ dans un scintillateur liquide dopé au gadolinium. Les énergies cinétique et d'annihilation déposées dans le liquide par le positron forment un signal prompt suivi du signal retardé de la capture du neutron sur le gadolinium. Pour ce genre d'expérience, le rejet du bruit de fond est un défi majeur, qu'il soit d'origine cosmique ou associé aux expériences voisines qui utilisent les

faisceaux de neutrons de l'ILL. C'est pourquoi des blindages lourds en plomb et en polyéthylène isolent le volume cible des flux externes de rayons gamma et de neutrons. Une réjection active du bruit de fond dominant dû aux rayons cosmiques est également mise en œuvre grâce à un détecteur veto muons réalisé au LPSC et à l'exploitation de la capacité de discrimination de forme de l'impulsion (PSD) du scintillateur.

Après les réparations du détecteur au cours de l'été 2017, la phase 2 (oct. 2017 - avr. 2019) et la phase 3 (avr. 2019 - nov. 2020) de la prise de données se sont révélées beaucoup plus stables avec des réponses très similaires de toutes les cellules. Cette période correspond à 273 jours de réacteur en marche, 520 jours de réacteur arrêté, et au final 107 558 antineutrinos détectés. Durant toute la durée de l'expérience, l'équipe du LPSC a assuré la coordination de la prise de données, une astreinte 24/24h, la vérification de la qualité de l'acquisition de données et du contrôle lent de l'expérience (conçus au LPSC), le prétraitement et le transfert des données au CCIN2P3 ainsi que la réalisation de l'ensemble des calibrations hebdomadaires.

Le bruit de fond est mesuré et soustrait avec précision grâce à l'alternance des périodes de fonctionnement et d'arrêt du réacteur. La soustraction "ON-OFF" implique un contrôle très précis de la réponse du détecteur pendant toute la durée de l'expérience. À cette fin, tous les paramètres du réacteur et du

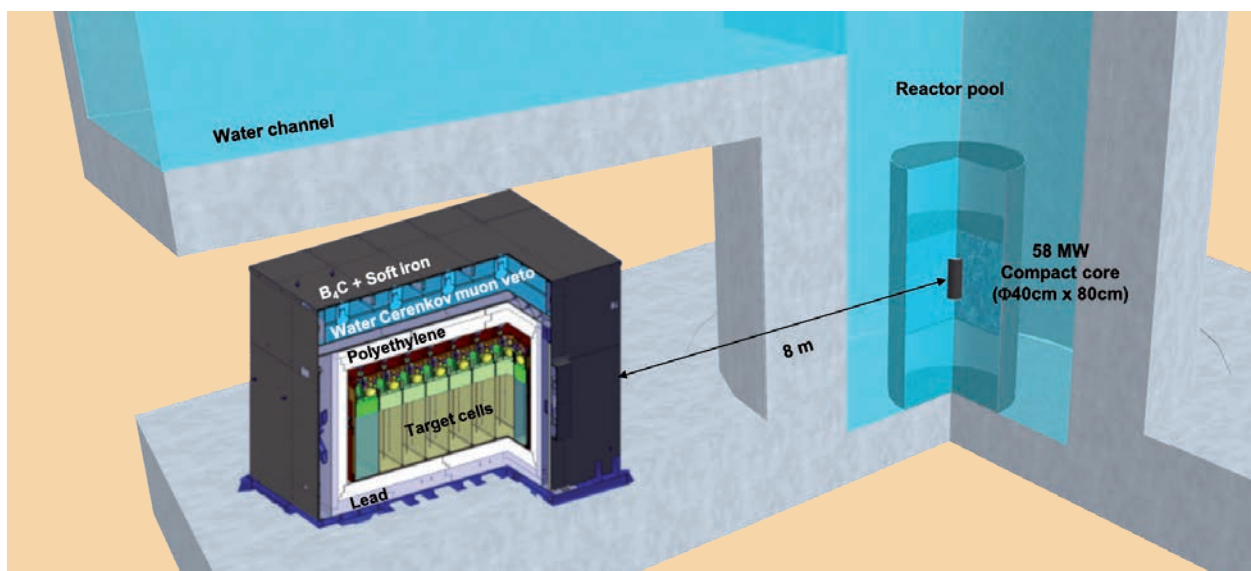


Figure 1. (crédit collaboration STEREO).

Configuration de l'expérience STEREO à proximité du cœur de l'ILL. Les six cellules identiques de la cible sont remplies avec 1,8 m³ de scintillateur liquide dopé au gadolinium (Target) et entourées d'une couronne remplie de liquide scintillant non dopé. La lumière est collectée par des tubes photomultiplicateurs au-dessus de chaque cellule. Un tampon en acrylique les sépare du liquide pour assurer une réponse homogène dans tout le volume de la cellule. Une couche de mu-métal protège le détecteur des champs magnétiques externes, et un écran de polyéthylène et de plomb l'isole des flux de neutrons et de rayons gamma. L'ensemble est recouvert d'un détecteur Cherenkov à eau permettant de détecter les muons cosmiques passant à proximité du volume cible. Une couche de fer doux et de caoutchouc chargé en bore complète la protection contre les champs magnétiques et les neutrons thermiques. La présence d'un canal d'eau au-dessus du détecteur offre une protection cruciale contre le fond cosmique.

détecteur sont contrôlés en permanence et leurs effets corrigés. L'équipe du LPSC a en particulier travaillé sur l'étalonnage en énergie du détecteur avec un ensemble complet de sources couvrant différentes énergies et topologies et sur la correction de l'évolution de la variable PSD, qui permet de distinguer les dépôts d'énergie de type électron (signal IBD) de ceux de type proton (bruit de fond) (thèse M. Vialat 2021).

L'équipe a également été responsable de la sélection du signal IBD. Elle se fait en deux étapes. Tout d'abord, des coupures utilisant la topologie des événements IBD, avec un signal prompt (annihilation e^+) suivi d'un signal retardé (capture neutron), puis dans un deuxième temps, un ajustement conjoint des distributions PSD ON et OFF est effectué dans chaque intervalle d'énergie, la différence entre ON et OFF donnant le nombre de candidats IBD (thèse L. Bernard 2019). Le taux moyen d'antineutrinos détectés est de 394 par jour avec un rapport signal-sur-bruit moyen proche de un. Le calcul précis des efficacités de sélection est basé sur les simulations Monte-Carlo. Cependant, la description de la physique des neutrons de basse énergie peut être imparfaite ; par conséquent, l'efficacité associée à la sélection du signal retardé a été validée avec les données de la source Americium-Béryllium, qui produit des paires corrélées (γ, n) ressemblant aux événements IBD [6]. La méthode ON-OFF ne tenant compte que des bruits de fond évalués lors des arrêts du réacteur, l'étude des événements induisant des reculs de proton a permis d'estimer un éventuel bruit de fond associé au fonctionnement du réacteur et de définir l'incertitude associée.

La recherche de neutrinos stériles exploite la dépendance de la distorsion spectrale induite par un modèle d'oscillation avec le neutrino stérile avec la distance le long de notre ligne de base (9-11 m). L'équipe du LPSC a développé une méthode permettant de tester les différentes hypothèses d'amplitude et de fréquence pour le neutrino stérile en comparant les spectres d'antineutrinos enregistrés dans les six cellules avec les spectres prédits par le modèle. L'indépendance par rapport au spectre émis par la fission de ^{235}U est obtenue en imposant dans l'ajustement de χ^2 un spectre d'énergie des antineutrinos émis qui soit libre et commun à toutes les cellules avant application du modèle d'oscillation (thèses L. Bernard 2019 et M. Vialat 2021). Le traitement statistique de ces données permet d'exclure une grande partie de l'espace des paramètres favorisés par l'anomalie des neutrinos de réacteur (RAA) à un niveau de confiance de 95% ou plus (figure 2) [5].

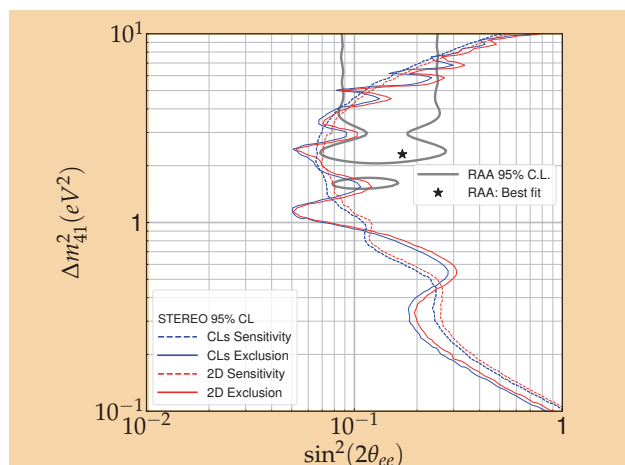


Figure 2. (crédit collaboration STEREO).

Résultats de l'analyse d'oscillations de STEREO. Le contour d'exclusion (rouge plein) et le contour de sensibilité (rouge pointillé) à 95% de niveau de confiance sont représentés en fonction de l'amplitude d'oscillation, $\sin^2(2\theta_{ee})$, ou θ_{ee} est l'angle de mélange entre les neutrinos actifs et stériles, et de la fréquence d'oscillation, Δm_{14}^2 , correspondant à la différence du carré des masses du neutrino supplémentaire et de l'état propre le plus léger. Les zones exclues se situent à droite des courbes. Ces résultats sont obtenus dans un cadre 2D de Feldman-Cousins (rouge), la méthode des niveaux de confiance gaussiens (CLs) donne un contour d'exclusion similaire (bleu). Le point initial du meilleur ajustement de la RAA, marqué par une étoile, est rejeté avec un niveau de confiance très élevé (valeur $p < 10^{-4}$).

En absence d'oscillation, STEREO a pu fournir à la communauté la mesure la plus précise à ce jour du spectre d'antineutrinos issus de la fission de ^{235}U exprimé dans le véritable espace d'énergie antineutrino (figure 3) [2][3]. L'analyse est réalisée en combinant la sélection des événements dans les six cellules du volume cible. On obtient ainsi un spectre en fonction de l'énergie reconstruite prompt déposée par le

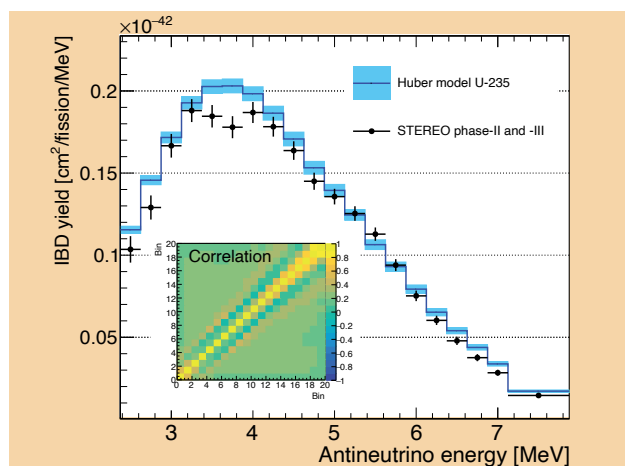


Figure 3. (crédit collaboration STEREO).

Nouveau spectre de référence des antineutrinos de ^{235}U produit par STEREO (points noirs), représenté avec la prédiction Huber-Mueller (bleu) dans l'espace d'énergie des antineutrinos. Les barres verticales et la bande bleue représentent les incertitudes totales respectives. L'axe vertical fournit le rendement absolu de l'IBD. La matrice illustre les corrélations bin-à-bin.

positron qui est relié à celui exprimé dans l'espace de l'énergie vraie des antineutrinos par la matrice de réponse du détecteur, dérivée de la simulation Monte Carlo. Lors du processus de dé-convolution que nous avons développé, les fluctuations statistiques et la résolution en énergie finie du détecteur induisent des instabilités numériques qui sont régularisées par une approche de type Tikhonov et dont les effets sont encodés dans une matrice de covariance et dans une matrice de filtre qui ont également été fournies.

Une spécificité de STEREO est de contrôler la normalisation absolue de la mesure et de bénéficier d'une bonne connaissance de la puissance du réacteur [4].

Ainsi, l'intégrale du spectre fournit la mesure la plus précise de la production d'antineutrinos par la fission de ^{235}U . Une déviation significative de la norme (déficit de $5.4 \pm 2.2\%$) et de la forme par rapport à la prédiction Hubert-Mueller ont été observées alors que dans le même temps l'hypothèse d'un neutrino stérile de masse autour de 1 eV est rejeté avec un niveau de confiance élevé.

Par ailleurs l'accord avec les plus récents modèles de sommation est bien meilleur, ce qui fait dire qu'au-delà de sa pertinence pour la physique fondamentale des neutrinos, notre mesure a aussi le potentiel de contraindre les données de fission avec notamment une sensibilité aux rendements de fission et à la description des transitions bêta des produits de fission.

Les physiciens du LPSC ont aussi proposé d'utiliser l'expérience STEREO, comme détecteur de neutrons et non plus d'antineutrinos pour repousser de plus d'un ordre de grandeur les limites de l'existence d'un état stérile du neutron, appelé aussi "neutron caché", prévu par plusieurs théories (neutron miroir, mondes branaires, ...) (figure 4) [1]. L'idée était de tester l'hypothèse selon laquelle un neutron pourrait se convertir en neutron caché, se propager à l'extérieur du réacteur et réapparaître plus loin au niveau du détecteur. Le cœur du réacteur de l'ILL est une puissante source d'hypothétiques neutrons cachés, le détecteur STEREO est sensible aux neutrons et se situe à proximité ce qui a fait de lui un traqueur hors pair de neutrons cachés !

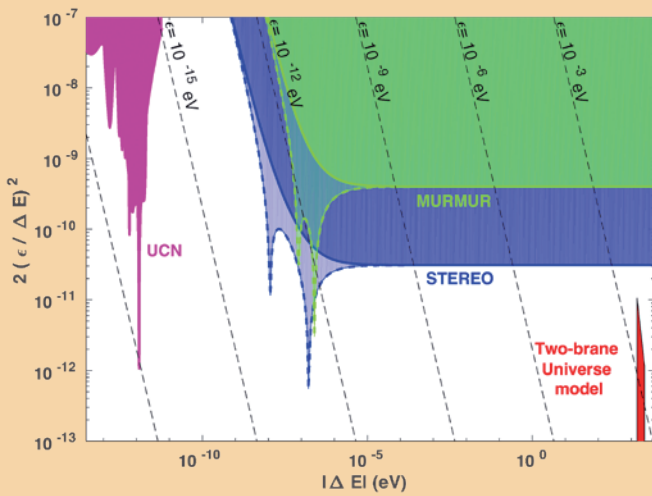


Figure 4. (crédit collaboration STEREO).

Contour d'exclusion des expériences STEREO (bleu), MURMUR (vert) et UCN (magenta). Les contours vert et bleu foncés (clairs) et bleu correspondent au cas $\Delta E > 0$ ($\Delta E < 0$). ΔE correspond à la différence d'énergie dans le vide entre l'état visible et l'état caché et ϵ correspond au paramètre de couplage entre ces deux états.

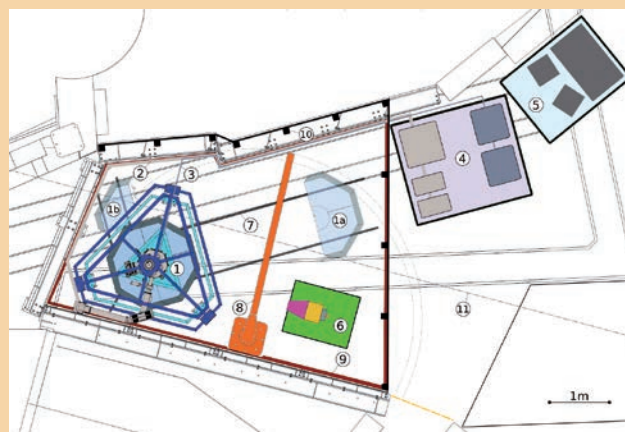
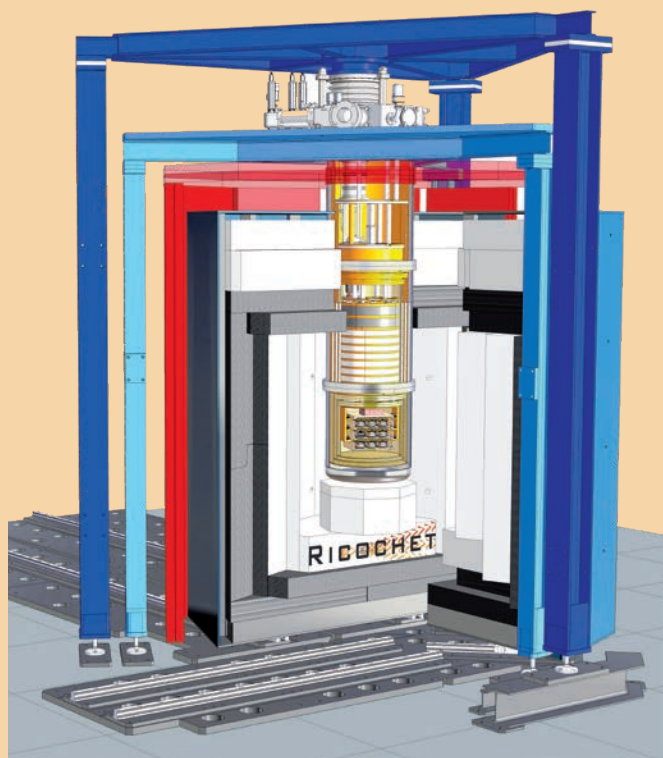


Figure 5. (crédit collaboration RICOCHET).

Ci-dessus : Schéma de l'intégration prévue de RICOCHET sur le site expérimental de l'ILL. Le cryostat est ancré mécaniquement grâce à deux structures triangulaires et entouré par les blindages passifs et actifs.

À gauche : Schéma de l'expérience RICOCHET. Le cryostat Hexa-Dry 200 de CryoConcept, porté par deux structures découplées mécaniquement (bleu), est entouré par le blindage passif multi-couche composé de polyéthylène (blanc), de plomb (gris) et de fer doux (noir). Le veto muon (rouge) est constitué de panneaux de scintillateurs plastiques disposés au-dessus et autour du blindage passif.

RICOCHET et la diffusion cohérente des neutrinos

Le projet RICOCHET a pour objectif principal de mesurer, pour la première fois à très basse énergie (<100 eV) et avec une très grande précision, le spectre en énergie des noyaux de recul issus de la diffusion cohérente des neutrinos. Une telle mesure à l'échelle du pourcent permettrait de sonder une variété de modèles de physique au-delà du modèle standard tels un moment magnétique du neutrino non nul, l'existence d'un nouveau boson d'interaction ou des interactions non-standard.

Pour ce faire, RICOCHET prévoit d'installer des détecteurs bolométriques, inspirés de ceux utilisés par les expériences de matière noire, auprès du réacteur de l'ILL, à l'emplacement exact du détecteur STEREO. RICOCHET pourra ainsi bénéficier des résultats de STEREO, aussi bien au niveau du spectre en énergie des neutrinos émis par le réacteur que des différentes sources de bruit de fond.

Deux technologies de détecteurs différentes et complémentaires sont développées en parallèle : des détecteurs semi-conducteurs au germanium et des détecteurs supraconducteurs au zinc. En plus d'une excellente résolution en énergie, ces détecteurs offrent

la possibilité de discriminer les reculs électroniques des reculs nucléaires et ainsi de réduire drastiquement le bruit de fond. C'est ce qui fait la spécificité du projet par rapport aux expériences concurrentes.

L'objectif est d'atteindre un rapport signal sur bruit supérieur à un, sachant que le signal attendu est une douzaine d'événements par jour pour une masse totale de détecteur d'environ 1 kg.

L'installation du détecteur et de son blindage débutera à l'automne 2022 pour un début de prise de données courant 2023, ce qui positionnera idéalement le projet RICOCHET parmi les autres projets concurrents.

Le LPSC a rejoint la collaboration RICOCHET en 2019. L'équipe Neutrino du LPSC est à l'initiative du choix de l'ILL comme site expérimental et apporte au projet sa connaissance du site acquise dans le cadre de STEREO ainsi que ses compétences sur les aspects liés aux bruits de fond. Une fraction importante des moyens nécessaires au déploiement de l'expérience à l'ILL et à l'aménagement du site a été obtenue de l'ANR dans le cadre de l'appel à projet 2020. L'équipe Neutrino a pris la responsabilité de la conception et la fabrication du blindage entourant le cryostat contenant les détecteurs (figure 5). Il est constitué d'une succession de blindages passifs composée de couches de polyéthylène boré, de plomb et de fer doux. L'ensemble est entouré par des panneaux de scintillateurs plastiques constituant un détecteur de muons agissant en veto.

La conception du blindage a nécessité des simulations avec le code GEANT4 pour valider la géométrie et les dimensions, puis les dessins mécaniques ont été réalisés au SERM, en prenant en compte les contraintes spécifiques au site de l'ILL, notamment un espace exigü, et en essayant de recycler au maximum les éléments du blindage de STEREO. Les différents éléments du blindage passif sont maintenant en cours de fabrication. Le châssis supportant

l'ensemble de ce blindage a été réalisé à l'atelier mécanique du LPSC.

Le LPSC s'est également impliqué, via le service électronique, dans le développement de l'électronique froide en contribuant à la conception et aux tests des étages d'amplification des signaux du détecteur. Toutes les activités sont financées via un projet ANR porté par le LPSC.

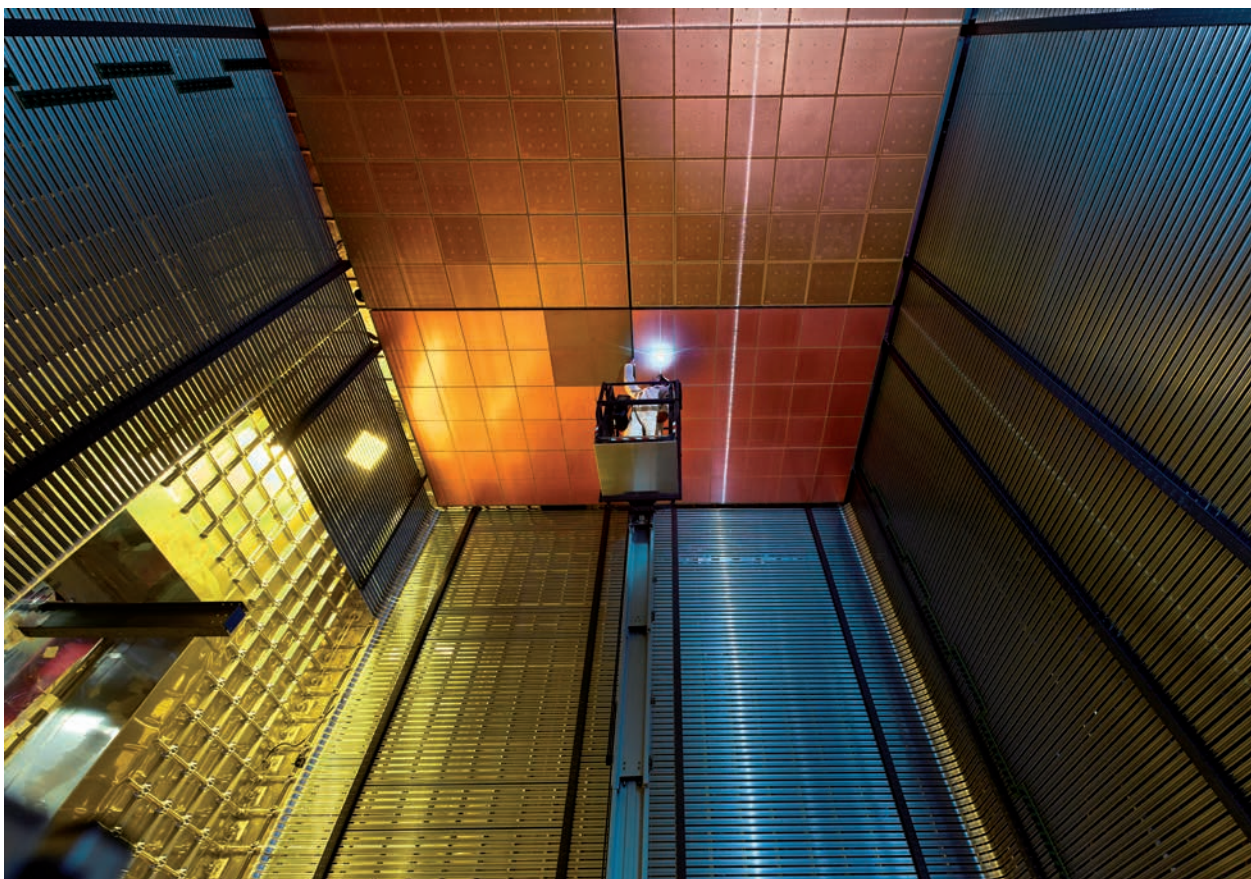
DUNE, une expérience phare pour la science des neutrinos

L'expérience DUNE vise à mesurer précisément les oscillations neutrino. 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 1 300 km de matière dans une mine du Dakota du Sud à 1 500 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 produits 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 les 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. 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

Figure 6. (crédit CERN).

Prototype 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 300 kV sur 6 mètres. 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, la porte en bas à gauche est fermée et le volume entier est rempli d'argon liquide.



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 deux 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. Un premier test du prototype a eu lieu en 2020 et 2021, mais l'arrêt de l'accélérateur du CERN n'a pas permis de prendre des données avec faisceau. Nous avons donc construit et installé un détecteur de muons cosmiques, ainsi que son électronique, qui ont été utilisés pendant ces deux années. Des problèmes sur la haute tension (300 kV) du prototype et sur la stabilité des plans de lecture ont conduit à des modifications sur ces deux aspects. Un autre prototype sera construit et testé en 2022-2023. Le LPSC a développé des capteurs capacitifs, ainsi que leur électronique, pour positionner très précisément les plans de lecture par rapport à la surface d'argon

liquide. Des tests de ces nouveaux plans de lecture ont été faits en 2021 et nous avons contribué aux prises de données et à l'analyse. Lorsque la construction de ces plans de lecture (CRP) débutera, le LPSC a proposé de produire la moitié des CRP. La conception de la ligne de montage est en cours avec l'aide du Service Détecteurs et Instrumentation et du Service Électronique du laboratoire. Cette ligne sera installée dans le hall Ariane et comportera les moyens de tests nécessaires pour garantir le bon fonctionnement des plans de lecture avant leur installation définitive aux États-Unis.

Les détecteurs finaux seront mis en route en 2028, mais le faisceau de neutrinos ne sera pas opérationnel avant 2030. Dans ce contexte, l'équipe étudie la sensibilité de l'expérience DUNE aux neutrinos atmosphériques pour contraindre les paramètres d'oscillation avec une attention particulière à l'apport que pourrait représenter la dérive verticale. Pour cela nous adaptons la simulation officielle de la collaboration à cette nouvelle technologie. En parallèle, pour avancer plus rapidement, nous avons développé nos propres outils afin d'avoir l'ordre de grandeur des erreurs auxquelles on peut s'attendre et de vérifier la faisabilité d'une telle étude.

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- "Recherche de neutrinos stériles auprès de l'ILL : l'expérience STEREO", Mathieu Vialat, Université Grenoble Alpes (2021). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03562694>
- "Recherche d'un neutrino stérile avec l'expérience STEREO : détermination des spectres neutrinos et caractérisation du bruit de fond", Laura Bernard, Université Grenoble Alpes (2019). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02471164>

Principales publications

1. "Searching for hidden neutrons with a reactor neutrino experiment: Constraints from the STEREO experiment", Phys. Rev. Lett. 128, 061801 (2022)
2. "Joint Measurement of the ^{235}U antineutrino Spectrum by PROSPECT and STEREO", Phys.Rev. Lett. 128, 081802 (2022)
3. "First antineutrino energy spectrum from ^{235}U fissions with the STEREO detector at ILL", J.Phys.G, 2021, 48 (7), pp.075107 (2021)
4. "Accurate Measurement of the Electron Antineutrino Yield of U-235 Fissions from the STEREO Experiment with 119 Days of Reactor-On Data", Phys. Rev. Lett. 125, 201801 (2020)
5. "Improved Sterile Neutrino Constraints from the STEREO Experiment with 179 Days of Reactor-On Data", Phys. Rev. D 102, 052002 (2020)
6. "Improved STEREO simulation with a new gamma ray spectrum of excited gadolinium isotopes using FIFRELIN", European Physical Journal A, 2019, 55: 183 (2019)

Ressources Web

- STEREO : <https://www.stereo-experiment.org/>
- DUNE : <https://www.dunescience.org/>
- DUNE à Fermilab : <https://lbnf-dune.fnal.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) qui réside dans l'utilisation d'un combustible liquide et non plus sous une forme solide classique, présente des avantages très intéressants pour le design, la sûreté, et la fabrication.

Dans la décennie écoulée, nous avons analysé scientifiquement les moyens de satisfaire aux critères des générateurs nucléaires de quatrième génération (sûrs, durables, non proliférants) tout en recherchant la plus grande simplicité. De cette analyse résulte un concept innovant de réacteur nucléaire à sel fondu, en cycle Thorium et à spectre neutronique rapide, différent du concept historique de l'ORNL et connu internationalement sous la dénomination de MSFR (Molten Salt Fast Reactor) de référence. De nouvelles études sont en cours sur d'autres versions du MSFR, notamment en tant que petit réacteur modulaire (Small Modular Reactor ou SMR) de faible puissance, en cycle U/Pu ou Th/233U.

Équipe de recherche : membres permanents

Daniel Heuer (responsable équipe de 2019 à 09/2020), Elsa Merle (responsable équipe depuis 09/2020), Michel Allibert (expert bénévole).

Équipe de recherche : doctorants

Thibault Le Meute, Laura Mesthiviers, Hugo Pitois, Thomas Sornay.

Orientations et travaux de recherche

Deux types de liquide peuvent être utilisés dans un réacteur nucléaire pour contenir la matière combustible et servir de réfrigérant, avec les spécifications correspondantes (transparence aux neutrons, problèmes de solubilité, propriétés thermiques et hydrauliques, température d'ébullition élevée et de fusion basse, pas de production problématique de radio-isotopes...), seules deux solutions se présentent, toutes deux étant des sels fondus : les sels de fluorure (à base de LiF) et les sels de chlorure (à base de NaCl, notre sel de cuisine). Ceci explique que les réacteurs à combustible liquide soient appelés réacteurs à sels fondus. 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. Ceci explique pourquoi les principales études réalisées dans l'équipe et axées sur le cycle du Thorium portaient sur les réacteurs à fluorure (comme le "MSFR de référence") [1,2,3,4], et les nouveaux développements pour concevoir des réacteurs capables de brûler des déchets nucléaires sont maintenant plus orientés vers les réacteurs à chlorure. Nous travaillons donc aujourd'hui sur les concepts RSF suivants :

- Le concept "MSFR de référence" (surgénérateur en cycle Th/233U avec sel fluoré, spectre neutronique rapide, grande puissance de 3 GW thermiques équivalente à un EPR pour identifier toutes les configurations viables au regard des considérations physiques et chimiques) : étudié et optimisé en neutronique, thermohydraulique, sûreté et chimie depuis 15 ans dans l'équipe et dans les projets européens EVOL, SAMOFAR, SAMOSAFER, également sélectionné par le Forum International Generation 4 et l'AIEA. Il possède un cœur torique d'environ 2,3 m x 2,3 m avec 18m³ de sel combustible.
- Un nouveau concept de MSFR équivalent au MSFR de référence en termes de puissance (3 GWth), de spectre neutronique (rapide) et d'objectif (surgénérateur produisant de l'électricité), mais étudié dans le cycle du combustible U/Pu et donc avec un sel de chlorure NaCl) : études d'optimisation réalisées dans le cadre du projet SAMOSAFER à travers la thèse de doctorat d'Hugo Pitois (financée par le projet Samosafer)
- Une version alternative de RSF considérée cette fois comme convertisseur/brûleur pour utiliser le plutonium et les déchets nucléaires actuels (actinides mineurs) comme combustible, basée sur un sel de chlorure NaCl+MgCl₂ et conçue pour être placée dans une boîte à gants donc avec une taille réduite (Small Modular Reactor ou

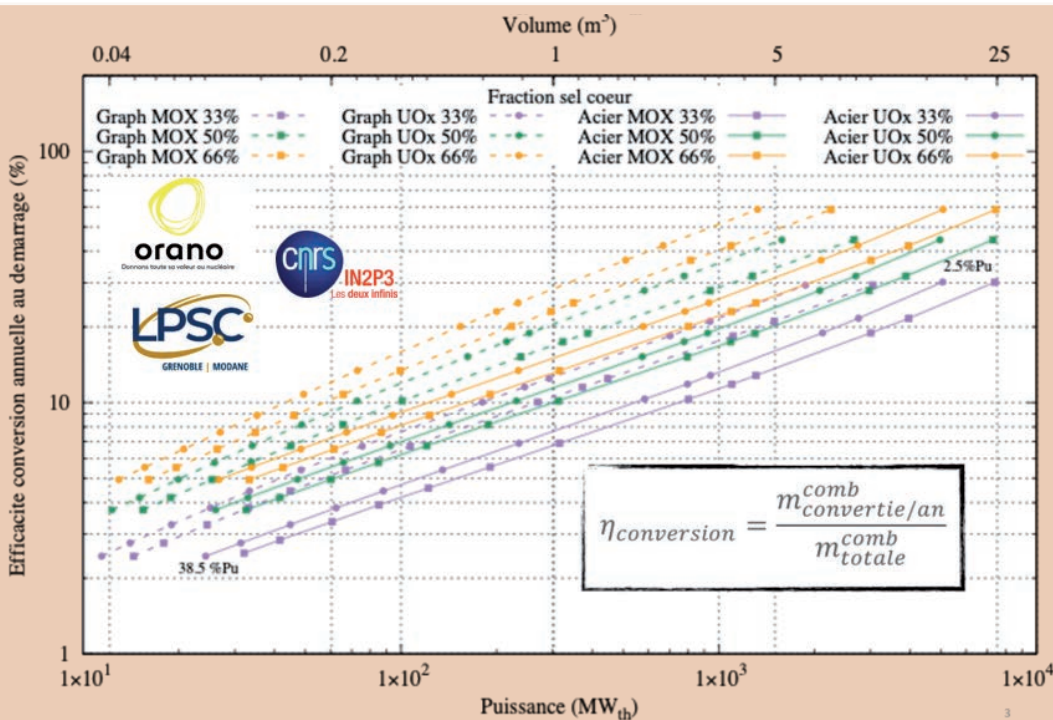


Figure 1.(crédit : Thèse CNRS/LPSC-Orano de Laura Mesthiviers (2019-2022)).

Étude de l'efficacité d'incinération du plutonium issu des réacteurs actuels pour plusieurs configurations de réacteurs à sels fondus convertisseurs d'actinides.

SMR) : ces études, initialement lancées par un contrat d'expertise demandé par Orano en 2019, sont menées dans la thèse de Laura Mesthiviers dans une collaboration CNRS-LPSC/Orano (voir Figure 1). Ce type de réacteurs est aussi au cœur de deux nouveaux projets préparés en 2021 et acceptés en 2022 (projet européen MIMOSA porté par Orano et projet français ISAC du plan de relance porté par le CEA).

- La conception d'un réacteur à sels fondus combinant les deux points ci-dessus, de petite taille et en cycle U/Pu, est aussi au cœur de la thèse de Thomas Sornay débutée en 2021, en collaboration avec Framatome Lyon.
- Depuis fin 2020, l'équipe travaille également sur le développement d'un concept de très petit réacteur à sels fondus (XSMR) avec la start-up

française NAAREA qui vise à construire un premier démonstrateur d'un tel réacteur dans les prochaines années.

Une méthodologie d'analyse de sûreté dédiée à de tels réacteur à combustible liquide circulant a été développée pour le MSFR en collaboration entre l'IRSN, l'équipe MSFR, Framatome et Politecnico di Torino dans le cadre du projet européen SAMOFAR (Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor) du programme H2020 [5,6]. Cette méthodologie est mise en application dans le projet européen actuel SAMOSAFER où l'équipe est en charge du groupe de travail "Reactor Operation and Safety Demonstration" notamment au travers de la thèse de Thibault Le Meute en collaboration avec le Service d'études des systèmes innovants (SESI) du CEA Cadarache [7], thèse qui porte sur l'étude des accidents d'insertion de réactivité et de leur impact sur le cœur du réacteur.

Développement récent : simulateur de pilotage du MSFR

Enfin l'équipe MSFR collabore depuis 2017 avec la société CORYS, filiale de Framatome et leader mondial de la simulation dynamique pour les industries du nucléaire, du transport et des hydrocarbures.

Comme illustré sur la figure 2, le code LiCore [8], mis au point dans l'équipe MSFR et qui permet une modélisation plus rapide que du temps réel du circuit combustible du MSFR, a été intégré avec succès dans ALICES, le jeu d'outils de simulation intégré conçu par CORYS pour le développement, la maintenance et l'exploitation de simulateurs de pilotage majeurs, tels que les simulateurs de centrales électriques. Les prochaines étapes du développement de ce simulateur de centrale seront l'ajout de dispositifs de contrôle-commande et l'amélioration de la modélisation des composants, comme la turbine.

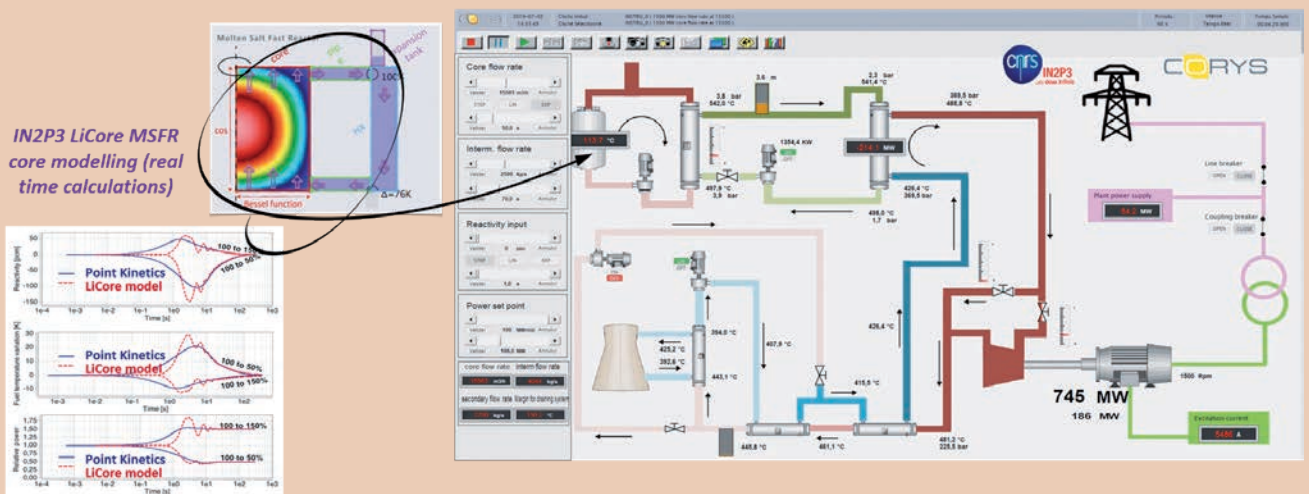


Figure 2. (France relance et projets européens). (crédit [8]).

Incorporation du code LiCore de calcul en temps réel du MSFR développé par le LPSC dans la plateforme développée par CORYS pour les simulateurs de pilotage des réacteurs REP du parc français [8]. Ce couplage permet l'utilisation d'outils avancés pour une meilleure représentation des systèmes en dehors de l'ilot nucléaire et sera utilisé dans le cadre des nouveaux projets de l'équipe .

POUR EN SAVOIR+

Principales publications (à forte implication des membres de l'équipe)

1. *IAEA Technical Reports Series on the Status of Molten Salt Reactor Technology*, Technical Report Series (TRS no.489), International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria) – preprint https://preprint.iaea.org/search.aspx?orig_q=RN:52090830 (2021)
2. *Neutronic benchmark of the molten salt fast reactor in the frame of the EVOL and MARS collaborative projects*, M. Brovchenko, J.L. Kloosterman, L. Luzzi, E. Merle et al., EPJ Nuclear Sci. Technol. 5 <https://doi.org/10.1051/epjn/2018052> (2019)
3. *Preliminary Proliferation Study of the Molten Salt Fast Reactor*, M. Allibert, E. Merle, S. Delpech, D. Gerardin, D. Heuer, A. Laureau, S. Moreau, EPJ Nuclear Sci. Technol. 6, 5 (2020) <https://doi.org/10.1051/epjn/2019062> (open access)
4. *Molten Salt Reactor to close the fuel cycle: example of MSFR multi-recycling applications*, J. Guidez, E. Merle, D. Heuer, S. Bourg, G. Campioni, M. Allibert, S. Delpech, P. Gauthé, A. Laureau, J. Martinet, J. Serp, Actes de la conférence internationale ICAPP2019, Juan les Pins, France (2019)
5. *Application of the lines of defence method to the molten salt fast reactor in the framework of the SAMOFAR project*, S. Beils, D. Gerardin, A.C. Uggenti, A. Carpignano, S. Dulla, E. Merle, D. Heuer, M. Allibert, EPJ Nuclear Sci. Technol. 5, 18 (2019), <https://doi.org/10.1051/epjn/2019031> (open access)
6. *Identification of the Postulated Initiating Events with MLD and FFMEA for the Molten Salt Fast Reactor*, D. Gerardin, A.C. Uggenti, S. Beils, A. Carpignano, S. Dulla, E. Merle, D. Heuer, A. Laureau, M. Allibert, Nuclear Engineering and Technology, 51(4), 1024-1031 (2019) doi: 10.1016/j.net.2019.01.009. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.01.009>
7. *Simplified criteria for a comparison of the accidental behaviour of Gen IV nuclear reactors and of PWRs*, F. Bertrand, N. Marie, A. Bachrata, J.B. Droin, X. Manchon, T. Le Meute, E. Merle, D. Heuer, Nuclear Engineering and Design, 110962 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110962>
8. *The LiCore Power Plant Simulator of the Molten Salt Fast Reactor*, A. Laureau, E. Rosier, E. Merle, S. Beils, O. Bruneau, J.C. Blanchon, R. Gathmann, D. Heuer, F. Passelaigue, F. Vaiana, A. Zanini, Actes de la conférence internationale 'PHYSOR 2020: Transition to a Scalable Nuclear Future', Cambridge, United Kingdom (2020)

Ressources Web

- <https://samosafer.eu/>
- <https://www.encyclopedie-energie.org/reacteurs-sels-fondus/>
- <https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/lin2p3-collabore-avec-lecole-de-design-de-framatome-sur-les-reacteurs-avances>

ÉQUIPE PHYSIQUE DES RÉACTEURS

Le principal objectif scientifique de notre équipe est l'étude académique de systèmes innovants (systèmes ou combustibles) pour la production d'énergie, la transmutation des déchets ou la propulsion spatiale. Ceci s'articule autour de trois thèmes principaux : la modélisation de la physique des réacteurs (incluant des études de sûreté, de transitoires, ...) en s'appuyant sur des expériences de validation (réacteur maquette^[1] et plateforme FEST), les mesures de données nucléaires pour les réacteurs, et les scénarios technico-économiques prenant en compte le mix énergétique. Nous privilégions une approche pragmatique permettant de faire face aux enjeux actuels (études innovantes sur des systèmes éprouvés) sans s'interdire de regarder des concepts plus novateurs.

Équipe de recherche : membres permanents

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

Équipe de recherche : doctorants

Davide Portinari (Doctorant), Franco Quinteros (Doctorant), Jonas Narvaez (Doctorant), Maxime Houdouin-Quenault (Doctorant), Kimon Kiramidas (Doctorant), Pamela Lopez (Doctorante, soutenance 2021), Daniela Reygadas-tello (Doctorante, soutenance 2021), Juan Blanco (Doctorant, soutenance 2021), Gabin Mantulet (Doctorant, soutenance 2020).

Personnels des services techniques

Julien Giraud (Service Études et Réalisations Mécaniques).

Modélisation de physique des réacteurs

Les études précédentes de petits cœurs refroidis à l'eau légère avaient permis de valider nos outils de simulation ainsi que l'ensemble de la démarche de conception les enchaînant (incluant neutronique d'équilibre, thermique couplée et calcul de transitoires). Elles avaient aussi montré que, au-delà des bonnes performances obtenues, l'eau légère et le nécessaire recours au bore soluble pour la gestion de la réactivité (l'alternative des poisons consommables restant limitée) sont autant d'obstacles à une véritable compétitivité en termes de conversion. C'est la raison pour laquelle des modes de gestion de la réactivité à la fois innovants et aussi pratiques que possible ont ensuite été étudiés. Une première piste prometteuse consiste à remplacer l'eau légère par de l'eau lourde,

dans laquelle de l'eau légère est introduite en cours de cycle de façon à maintenir la criticité [2]. Nous avons pu vérifier qu'outre une sûreté satisfaisante via un transitoire d'éjection de grappes – localisée sur la figure 1(a) par le cercle orange - un tel SSCR (Spectral Shift Control Reactor) peut atteindre la régénération en cycle thorium à condition d'être suffisamment sous-moderé (réseau 21x21 et rapport de modulation de 0.8). Cette étude a également été l'occasion de normaliser notre schéma de calcul, baptisé KNACK (Knack of Nodal Approach to Core Kinetics). Pour tester la robustesse de ce dernier, nous l'avons appliqué à l'étude par simulation de l'expérience KRUSTY menée jusqu'en 2020 au LANL pour la démonstration d'un petit cœur rapide dédié à la production d'électricité pour le spatial [3]. Une analyse neutronique très détaillée a ainsi été réalisée - voir figure 1(b) - et complétée par la conception de quelques versions extrapolées en puissance. Confrontée aux spécificités intéressantes de cette expérience, la méthode NDM de cinétique spatiale a trouvé quelques-unes de ces limites. Cela a conduit au développement (en cours) d'une version généralisée de cette méthode, appelée sNDM (super Nodal Drift Method).

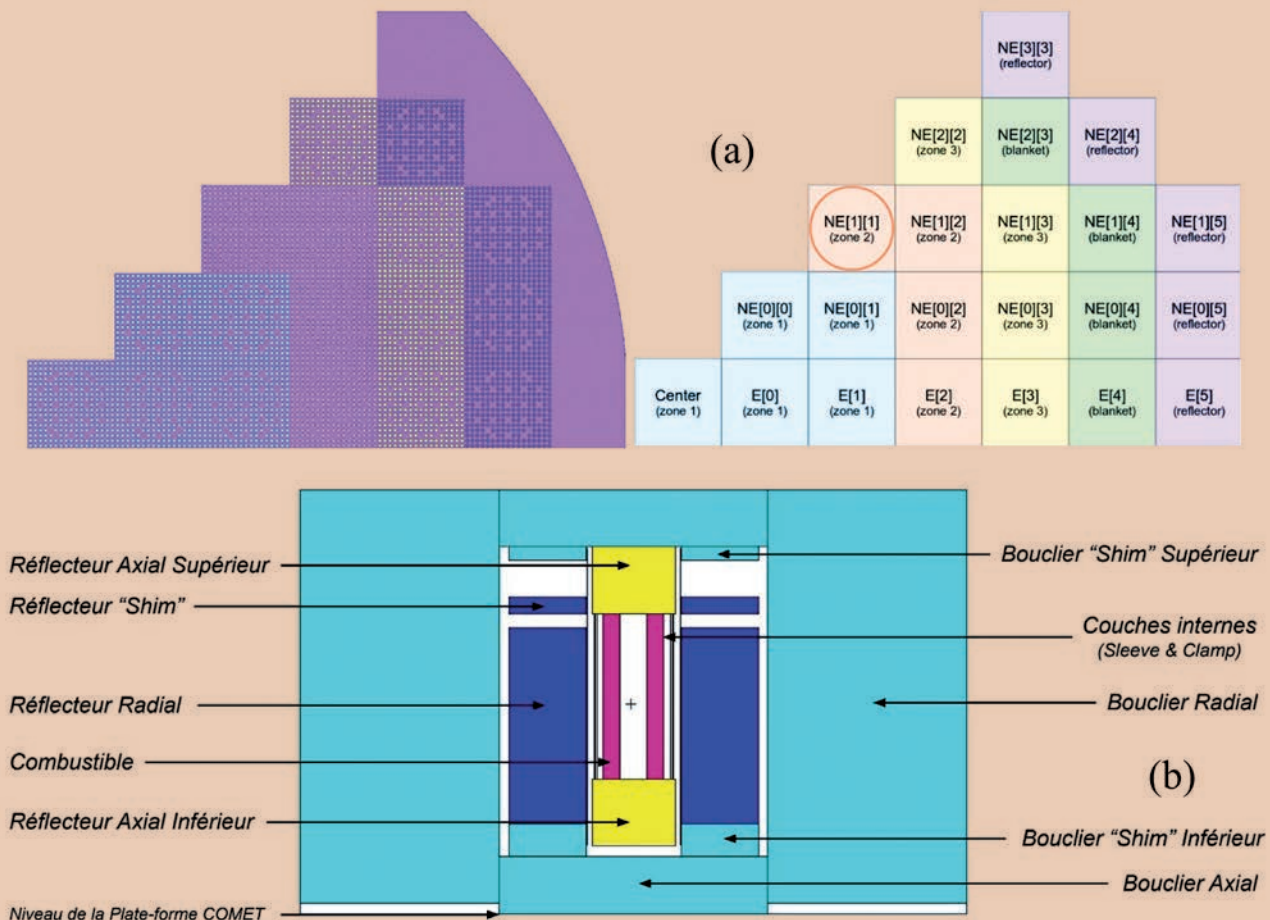


Figure 1. (Crédit A. Nuttin et al. / CNRS [2] et N. Buj / CNRS [3]).

Coupe radiale du cœur à caloporteur D₂O/H₂O et combustible Th/U, tel que modélisé par Serpent 2 (à gauche) via SMURE et par NDM (a). Coupe longitudinale d'un modèle MCNP équivalent de l'expérience KRUSTY (LANL), utilisé comme point de départ pour la mise au point de la sNDM (b).

SMURE ^[4] est un outil développé dans un cadre collaboratif (LPSC – IJCLAB – Subatech-Nantes et iUS (Allemagne)), dont le but est de gérer de façon flexible l'évolution du combustible et le couplage avec un code de transport neutronique Monte-Carlo (Serpent 2 ou MCNP). Ce code est distribué

via l'OCDE-NEA sous licence LGPL. Lors de ces 2 dernières années, la version 3 de SMURE implémentant de nouvelles fonctionnalités (méthode CRAM (Chebyshev Rational Approximation Method), nouvelle structure, ...) a été développée.

Conception algorithmique d'équipements nucléaires

Un algorithme d'optimisation topologique (OptTop), conçu au sein de l'équipe pour optimiser le transport de particules dans la matière, a été appliqué à la conception de modérateurs de neutrons pour une

technique de radiothérapie appelée Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). L'objectif était de concevoir un modérateur à interposer entre une source de neutrons et un patient, qui maximise en sortie le contraste entre la dose déposée dans une tumeur cible et celles déposées dans les tissus sains. Testé pour une source d-⁹Be, pourtant énergétique, l'algorithme OptTop a pu identifier des formes de modérateurs originales, qui génèrent des doses aux tissus sains inférieures aux doses limites recommandées les plus basses. Les modérateurs ainsi conçus présentent des formes élaborées, inaccessibles dans leurs détails à l'intuition humaine et aux techniques de conception conventionnelles ^[5].

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 nécessaires au développement d'applications innovantes concernant les réacteurs nucléaires ou les systèmes énergétiques nucléaires en général. Le volet expérimental est mené à la plateforme FEST du laboratoire et nous continuons le développement de notre outil de simulation multiphysique basé sur un couplage du code OpenFOAM et de SERPENT. OpenFOAM est une librairie C++ contenant des outils permettant de développer des

solveurs numériques axés principalement sur des méthodes de volumes finis pour la mécanique des milieux continus et SERPENT, un code neutronique de type Monte Carlo. Pendant la période concernée, nos activités se sont déclinées à travers les trois sujets suivants.

Modélisation des Réacteurs à Sels Fondus (RSFs)

Dans le cadre du Project European SAMOFAR (2015-2019) nous avons testé un modèle expérimental de bouchon froid ^[6] (vanne passive pour effectuer la vidange du réacteur MSFR, voir figure 2). À partir des résultats obtenus, nous avons développé un nouveau concept de bouchon froid adapté à la puissance et à la géométrie du réacteur MSFR étudié dans ce projet. Par la suite, nos activités se sont poursuivies dans le projet European SAMOSAFER (2019-2023) avec des études expérimentales et numériques sur des phénomènes spécifiques aux écoulements des sels fondus : (i) le transfert par rayonnement thermique au sein de l'écoulement, (ii) les écoulements gravitaires sur une surface libre avec ou sans solidification et (iii) la convection naturelle (Thèse J. Narvaez en collaboration avec Politecnico de Milano).

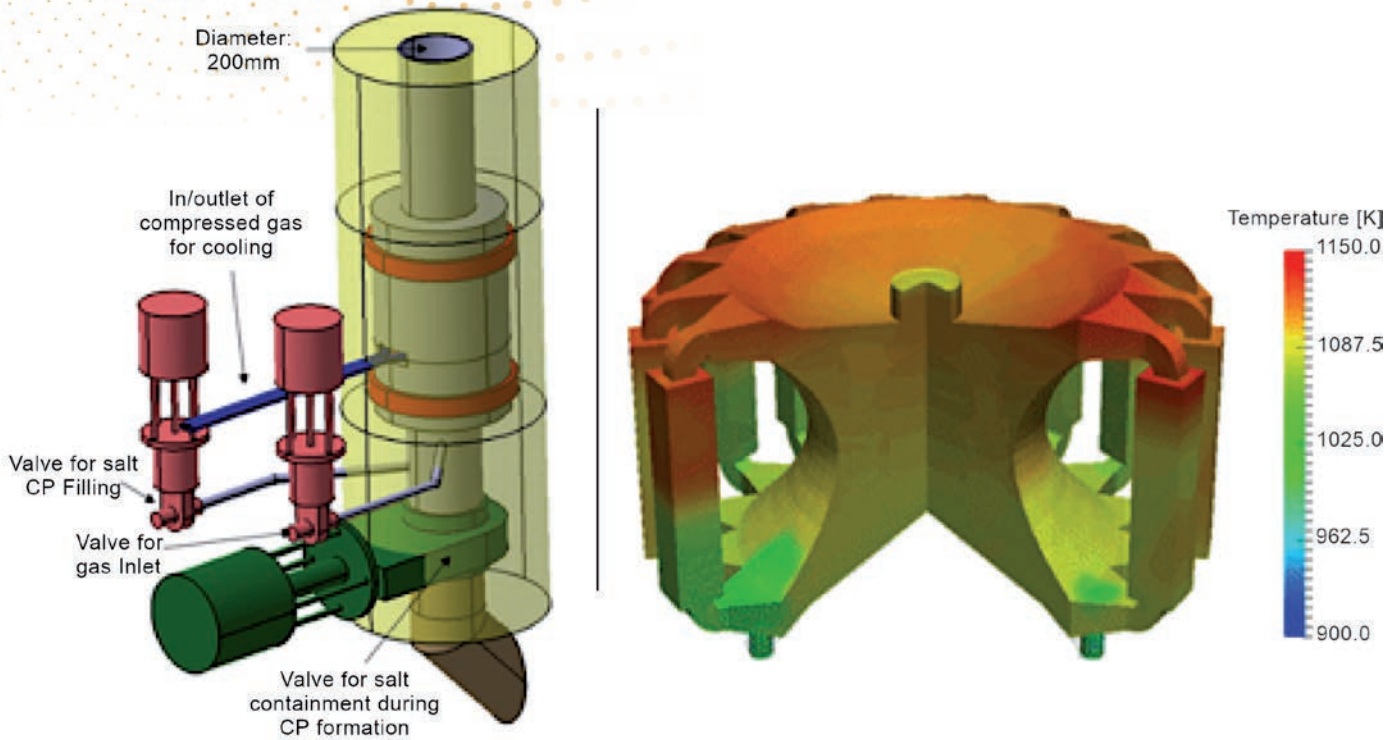


Figure 2. (Crédit Gauche : J. Giraud et al. [6]; Droite : M. Tano-Retamales, et al. /CNRS).

Système de vanne à bouchon froid (à gauche) proposé pour le MSR dans le cadre du projet SAMOFAR. Ce système est basé sur le concept du bouchon froid développé dans le cadre de la plateforme FEST. Ce concept de bouchon froid (Vanne passive pour vidanger le sel combustible en cas d'accident) a été ensuite utilisé pour étudier avec l'outil multi-physique un accident de Perte Totale d'Alimentation Electrique (à droite).

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

Depuis 2018 nous développons des études sur les réacteurs de propulsion nucléaire pour l'espace avec l'objectif principal de proposer un concept permettant de dépasser les verrous actuels de cette technologie. Le défi associé à la conception de ce petit réacteur nécessite l'implémentation d'un modèle numérique multi-physique de tous les composants du réacteur du fait du fort couplage existant entre les divers systèmes. Le concept de propulsion retenu dans

un premier temps est de type propulsion nucléaire électrique (NEP) : un microréacteur à Sel Fondu (RSF) couplé à un système de conversion d'énergie permettant d'alimenter un système de propulsion électrique (puissances thermiques entre 10 kW et 1 MW). Une thèse (F. Quinteros, 2019-2023) focalisée sur la modélisation du réacteur spatial au moyen de notre outil multi-physique [7] a permis en 2020 d'effectuer une première simulation détaillée d'un concept de Réacteur à Sels Fondus Spatial Rapide (RSFER, voir figure 3).

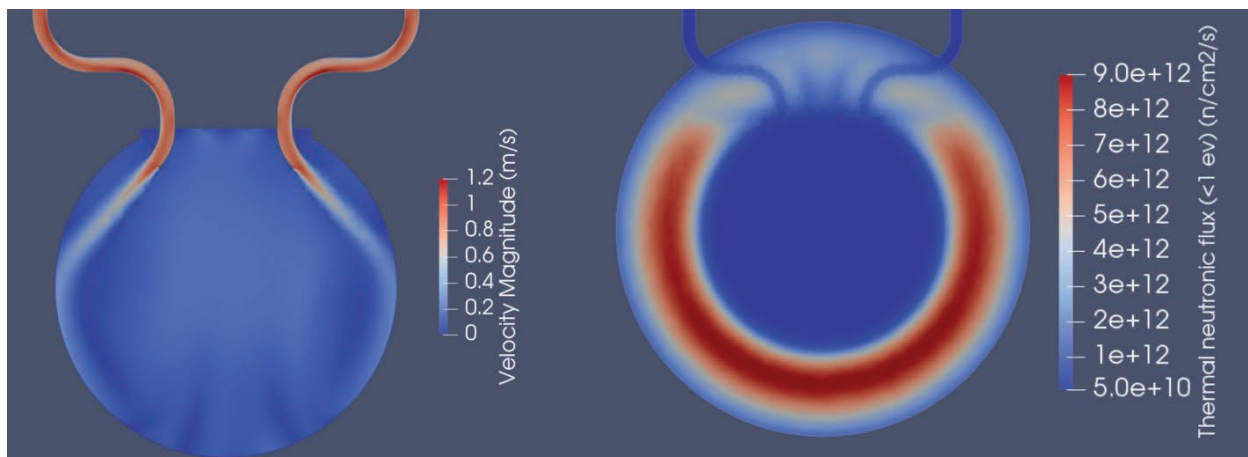


Figure 3. (crédit F. Quinteros / CNRS).

Évaluation d'un concept réacteur de propulsion nucléaire électrique du type Réacteur à Sels Fondus (RSF) à neutrons rapides à l'aide de l'outil multi-physique (Thèse F. Quinteros). À gauche : Vitesses du sel combustible prédites par l'outil multi-physique dans la cavité cœur ; À droite : Flux neutronique thermique déterminé par l'outil multi-physique dans le combustible et le réflecteur.

Modélisation des accidents graves et de criticité

Ces activités ont été développées dans le cadre d'une collaboration avec l'IRSN et ont pour but de développer des modèles multi-physiques pour l'étude des accidents de criticité dans des installations nucléaires présentant des phénomènes particulièrement complexes et géométries et matériaux divers : on peut citer par exemple les accidents dans les piscines de combustibles irradiés, les expériences d'injection rapide de réactivité dans des réacteurs de recherche (Godiva, Silene, Cabri, etc.) ou encore des accidents de criticité dans des installations de fabrication ou

de retraitement du combustible. Les outils multi-physiques basés sur des approches du type CFD pour la mécanique des fluides et Monte Carlo pour la neutronique sont particulièrement bien adaptés dans ces situations. Dans le cadre de la thèse de J. Blanco (2017-2020) notre outil multi-physique a été adapté à ce type d'études grâce au développement de : (i) Solveurs neutronique transitoire basé sur une méthode Monte Carlo Quasi-Statique, (ii) Solveurs neutronique transitoire basé sur une méthode SP1 ou SP3^[8], (iii) Solveur milieu poreux avec des écoulements diphasiques. L'outil multi-physique a été transféré à l'IRSN.

Mesures de données nucléaires et études de sensibilités

Depuis 2010, la collaboration formée par le CEA, le LPSC et l'ILL est impliquée dans les mesures de rendements de fission auprès du spectromètre Lohengrin de l'ILL. Ces deux dernières années ont été consacrées à la clôture du programme expérimental sur le $^{241}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$. Ce programme aura permis de produire de nouvelles séries de mesures de rendements en masse et isotopiques dans la région du pic lourd. Pour chacune de ces mesures, un travail spécifique pour fournir les matrices de corrélations expérimentales a été réalisé. Des résultats importants ont également été obtenus sur la polarisation de charges (Z) dans la

région des fragments lourds. Ces données sont indispensables pour tester et améliorer les évaluations des rendements de fission pour lesquelles des mesures restent cruciales.

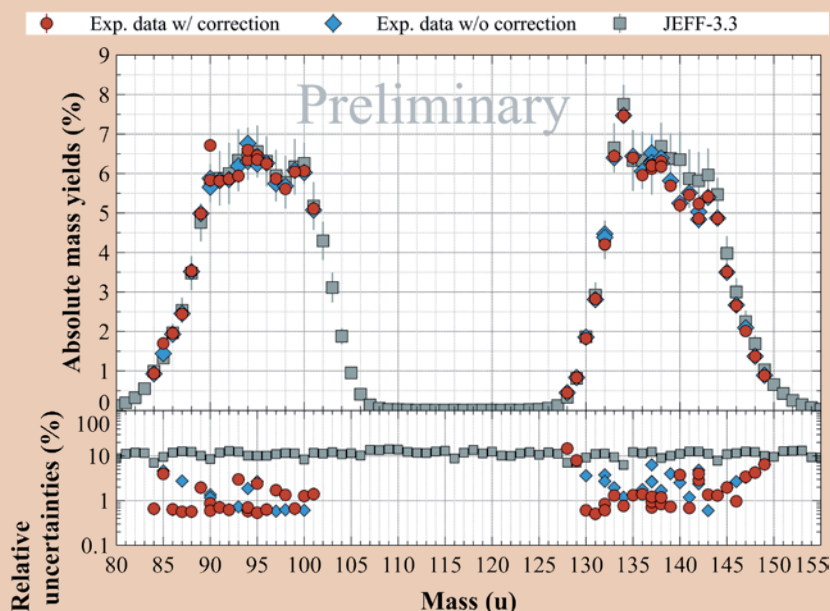
Dans le cadre de la thèse de M. Houdouin-Quenault, une nouvelle mesure de précision des rendements en masse de $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ auprès du spectromètre de masse Lohengrin a été engagée en 2020. L'objectif est double :

- i) appliquer à la réaction $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ la nouvelle méthodologie de mesures et d'analyses de la collaboration (testée sur les noyaux de ^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) à ce noyau clé pour le cycle et
- ii) fournir la première matrice de covariance expérimentale complète sur l'ensemble des régions de masses produites par la fission^[9,10].

Deux campagnes expérimentales se sont déroulées en mai 2021 (16 j) et septembre 2021 (7 j), dont les résultats préliminaires sont présentés sur la figure 4.

Figure 4. (crédit M. Houdouin-Quenault / CNRS).

Mesures complémentaires des hauts rendements de $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ sur les pics lourds ($A \sim 140$) et légers ($A \sim 95$) en fonction de la masse A de chaque fragment de fission (en unité de masse atomique). Résultats préliminaires.



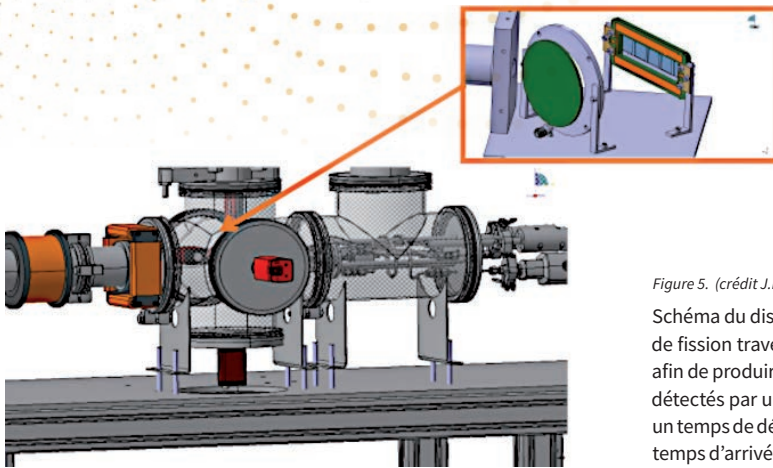


Figure 5. (crédit J.F. Muraz / CNRS).

Schéma du dispositif de temps de vol (ToF). Le faisceau de produits de fission traverse une fenêtre en SiN placée à 45° dans le faisceau afin de produire des électrons (voir encart). Les électrons sont alors détectés par une Microchannel Plate (disque vert) et donnant ainsi un temps de départ (premier dispositif représenté sur la figure) et un temps d'arrivée (second dispositif identique, non représenté).

En parallèle, l'upgrade du spectromètre avec l'ajout d'une ligne de temps de vol est en cours pour améliorer la sensibilité de l'instrument. L'objectif est de mesurer des rendements en masse dans la région des masses symétriques en vue de tester par une méthode directe l'existence des modes de fission lors d'une réaction induite par neutrons thermiques. Pour cela, un prototype d'une ligne de temps de vol a été initié et testé lors d'une campagne expérimentale en juillet 2021 auprès du spectromètre Lohengrin. Deux types de détecteurs sont en cours d'études : les channeltrons et des scintillateurs rapides montés sur des SiPM. Ces choix sont dictés par la contrainte de fonctionner avec le vide secondaire dégradé (10^{-5} – 10^{-6} mbar) qui règne à l'extrémité de l'instrument Lohengrin. À l'heure actuelle, les résultats sur les détecteurs indiquent une résolution en temps insuffisante (σ ~500 ps, analyse en cours). Le recours à une ligne de temps de vol dédiée en ultravide (10^{-8} mbar) pour garantir un vide de quelques 10^{-7} mbar est donc indispensable pour utiliser des détecteurs de type MCP (Microchannel plate) ayant la résolution en temps nécessaire (σ ~100 ps) pour notre projet (voir figure 5).

Les études de sensibilités et d'incertitudes ont beaucoup bénéficié d'une dynamique dans la communauté, qui a permis d'obtenir des soutiens industriels au moment où des progrès des outils numériques importants ont été obtenus. Avec l'avènement des calculs de sensibilités dans les Monte Carlo auquel le groupe a participé, la thématique détient enfin une solution de référence. L'équipe porte un projet de collaboration NEEDS sur le sujet. Ces méthodes et d'autres ont été utilisées par P. Lopez, pour démontrer dans sa thèse soutenue par EDF, la faisabilité de toutes les étapes de maîtrise des incertitudes dans une chaîne industrielle, depuis les sensibilités jusqu'à l'apprentissage des données du Retour d'Expérience Industrielle. Dans sa thèse, soutenue par Technicatome et l'Institut Laue-Langevin, D. Portinari a utilisé ces outils, et aussi développé des modèles simplifiés qui lui permettent d'étudier la difficile question de la propagation des incertitudes en évolution à laquelle il a ajouté un nouveau terme pour prendre en compte le contrôle de la réactivité (voir figure 6).

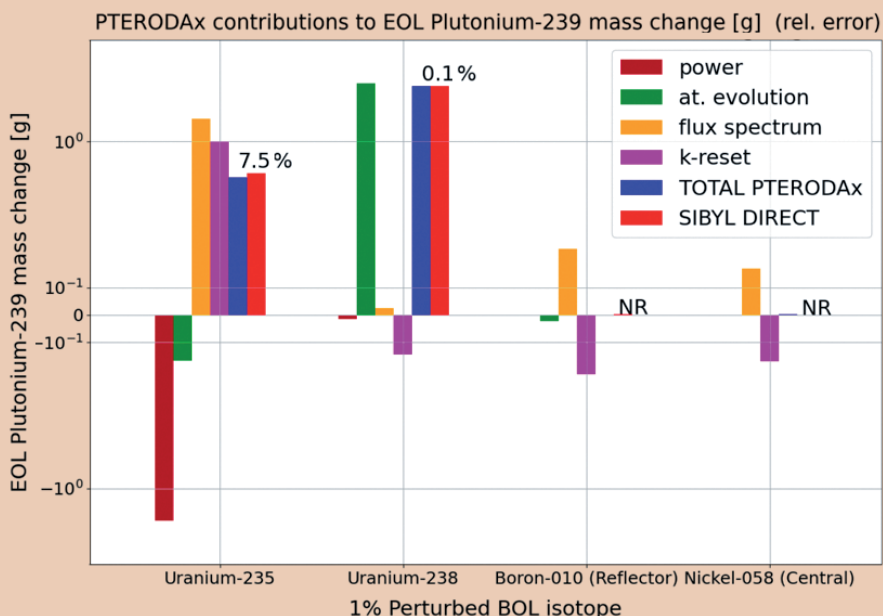


Figure 6. (crédit : D. Portinari et al. / CNRS).

Sensibilité au chargement initial de la masse finale de ^{239}Pu dans le combustible de l'ILL. La sensibilité au chargement initial en ^{235}U est le résultat de la compensation de 4 termes de signes opposés. Alors qu'ils ont un rôle majeur dans le contrôle de la réactivité, Bore et Nickel (présents dans la barre de commande), du fait de compensation presque parfaite n'ont pas d'impact sur la plupart des sorties dont celle présentée sur la figure.

Scénarios technico-économiques

Les études de scénarios sont au cœur de l'actualité climatique ou géo-politique. Les recherches en collaboration avec les économistes de l'énergie se poursuivent, sur les questions de scénarios de long terme, ou sur des sujets de valorisation de la flexibilité.

D'une part, G. Mantulet a soutenu sa thèse qui a permis de préciser la place des gaz bas-carbone dans la transition. D'autre part, K. Keramidas étudie les leviers de décarbonation des secteurs de production de matériaux non énergétiques, acier et béton qui contribuent à près de 15 % aux émissions, avec un focus sur l'utilisation de l'hydrogène (voir figure 7). Dans les deux cas, seul un outil complet de modélisation prospective mondial comme POLES permet l'obtention de détails différents en fonction des pays sur les méthodes de production, les vecteurs utilisés ou les types d'usages générateurs de GES.

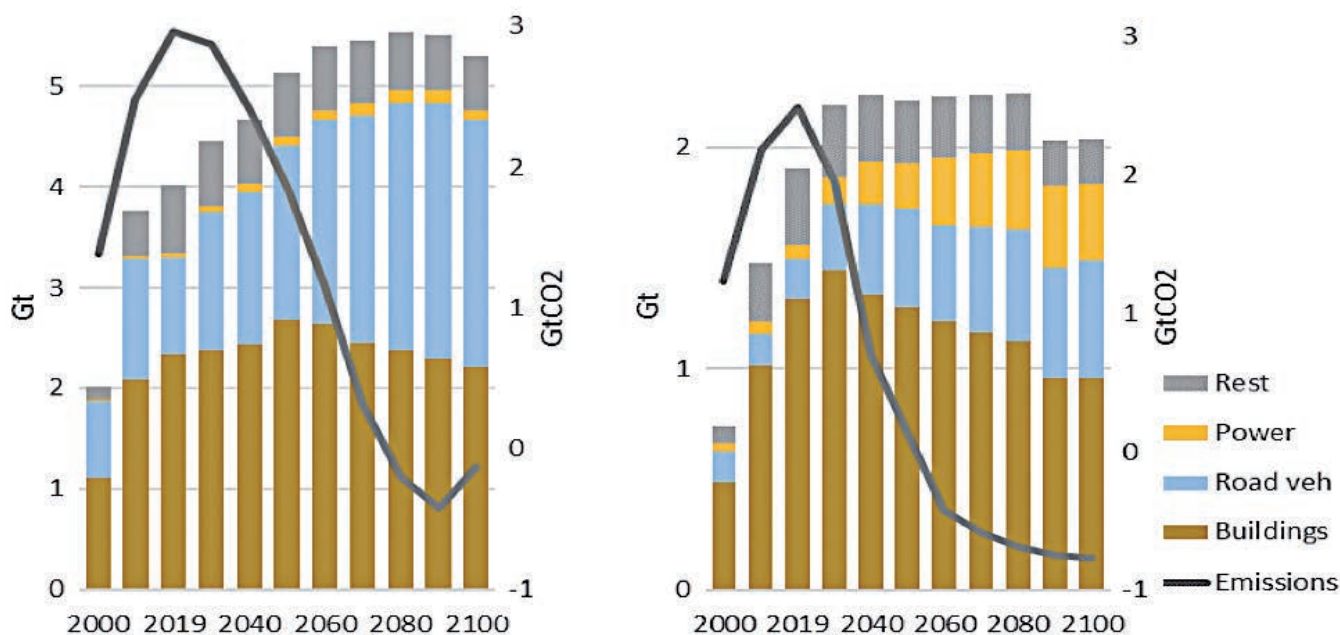


Figure 7. (crédit : K. Keramidas et al. / CNRS).

Évolution des productions (échelle gauche) et émissions CO₂ (échelle droite) de la production de ciment (gauche) et d'acier (droite). Les deux matériaux suivent des trajectoires qui se ressemblent mais sont le cumul de trajectoires très différentes des pays sous-jacents, avec leur diversité de sources d'énergie, ou de domaines de consommation. Grâce à la décarbonation de l'électricité qui peut être produite en partie par de la biomasse avec de la Capture/Séquestration du CO₂, les émissions associées à l'acier pourraient devenir "négatives", contrairement au ciment dont la consommation d'énergie et le procédé peuvent plus difficilement être décarbonés.

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *High resolution gamma-ray spectroscopy of neutron rich Br and Kr fission fragments*, D. Reygadas-Tello, 30/09/202. <http://www.theses.fr/2021GRALY053>
- *Méthodes de dimensionnement des incertitudes d'une chaîne industrielle de calcul cœur*, P. Lopez, 30/09/2021. <http://www.theses.fr/2021GRALI078>
- *Couplage neutronique, thermohydraulique et thermomécanique pour la modélisation des accidents de criticité dans des systèmes nucléaires*, J. Blanco, 11/12/2021. <http://www.theses.fr/2020GRALI078>
- *La contribution des gaz renouvelables à la décarbonation des systèmes énergétiques*, G. Mantulet, 04/06/2020. <http://www.theses.fr/2020GRALI029>

Principales publications

1. *Reactivity monitoring of the accelerator driven VENUS-F subcritical reactor with the "current-to-flux" method*, N. Marie, J.L. Lecouey, G. Lehaut, T. Chevret, A. Billebaud, et al., *Annals Nucl. Energy*, 2019, 128, pp.12-23. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01975522>
2. *Study of D2O/H2O-cooled thorium-fueled PWR-like SMR cores using the KNACK toolbox: conversion and safety assessment*, A. Nuttin et al., *Proc. Int. Conf. ICAPP 2019*. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03782798>
3. *Analyse neutronique du démonstrateur KRUSTY et évaluation des limites du concept en termes de puissance totale et d'enrichissement*, N. Buj, mémoire de PFE, PHELMA (2021). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03781591>
4. SMURE online : <https://lpsc.in2p3.fr/MURE/MURE.html>
5. *Heavy-water-based moderator design for an AB-BNCT unit using a topology optimization algorithm*, S. Chabod, J. Giraud, et al., *Phys. Med. Biol.* 67 (2022) 105009. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03668903/>
6. *Development of a Cold Plug Valve with Fluoride Salt*, J. Giraud J., V. Ghetta V., P. Rubiolo, M. Tano Retamales, *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, Vol. 5 (2019) pp. 1-12. <https://doi.org/10.1051/epjn/2019005>
7. *A Numerical Tool for Space Nuclear Reactor Design based on Molten Salt Reactors (MSRs)*, P. Rubiolo, M. Tano, J. Blanco, V. Ghetta, J. Giraud, V. Richard, F. Quinteros, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 122, N°1, pp. 679-681, ANS Virtual Annual Meeting, June, 2020.
8. *Results from a multi-physics numerical benchmark for codes dedicated to molten salt fast reactors*, M. Tibergera, R. Gonzalez Gonzaga de Oliveira, E. Cervi, J. A. Blanco, S. Lorenzi, M. Aufiero, D. Lathouwers, P. Rubiolo, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 142, (2020) pp. 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107428>
9. *Measurements of $^{233}\text{U}(n_{sp}, f)$ fission product mass yields with the LOHENGRIN recoil mass spectrometer*, A Chebboubi et al., *The European Physical Journal A* 57 (12), 1-21 (2021) <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03518859/>
10. *Fission fragments observables measured at the LOHENGRIN spectrometer*, S Julien-Laferrrière et al., *EPJ Web of Conferences* 239, 05017. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023905017>

ÉQUIPE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET APPLICATIONS MÉDICALES

L'équipe a des activités de recherches 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 et l'INSERM (équipe STROBE). 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), en physique nucléaire (en collaboration avec l'équipe physique des réacteurs pour la détection de fragments de fission) et en physique théorique (structure nucléaire).

Équipe de recherche : membres permanents

Marie-Laure Gallin-Martel (responsable depuis janvier 2021), Yannick Arnoud, Denis Dauvergne, Rachel Delorme, Sara Marcatili, Olivier Rossetto, Gabriela Thiamova.

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Sébastien Curtoni (soutenu novembre 2020), Pierre Everaere, Maxime Jacquet, Victor Levrague, Robin Molle, Nicolas Rosuel (soutenu décembre 2021) (doctorants), Saba Ansari-Chauveau et Maria Pedrosa Rivera (post-doctorantes).

Personnels des services techniques

Jean-Luc Bouly, Laurent Gallin-Martel, Christophe Hoarau, Éric Lagorio, Nicolas Ponchant, Fatah Rarbi, Mahfoud Yamouni (Service Électronique), Olivier Guillaudin, Jean-François Muraz (Service Détecteur et Instrumentation).

Monitoring faisceaux pour la radiothérapie FLASH, les microfaisceaux ou l'hadronthérapie

Les radiothérapies innovantes visent à améliorer la réponse thérapeutique à certains cancers, en augmentant l'efficacité sur le contrôle tumoral ou en diminuant la toxicité aux tissus sains environnants en jouant sur la ballistique du faisceau (pic de Bragg en hadronthérapie) ou 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, et les outils pour le faire n'existent pas encore pour ces thérapies innovantes.

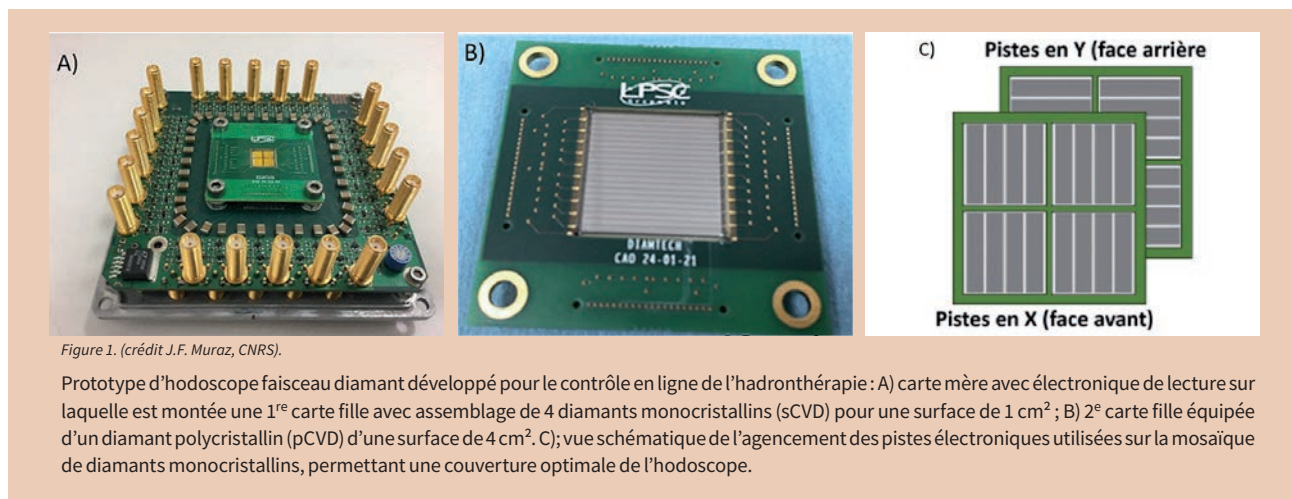
Le projet iDORA a été financé par la SATT Link-sium dans la suite du projet TraDeRa. TraDeRa avait atteint la preuve de concept après des tests sous faisceaux de radiothérapie du CHU de Grenoble. Les concepteurs de la future génération de Linacs (linear accelerator) à haut débit de dose sont à la recherche d'un dispositif de mesure en temps réel et en 2D des faisceaux de très haute intensité. iDORA est une chambre moniteur temps réel innovante à large gamme dynamique pour permettre un monitoring faisceau de la RT conventionnelle (débit de dose ~ 1 Gy/min) à la RT FLASH (très haut débit de dose supérieur à 100 Gy/s, avec jusqu'à ~ 10 Gy délivré dans 1 pulse de l'ordre de la microseconde). La technologie d'iDORA s'inspire de celle des chambres micromégas avec un volume actif très faible pour surmonter la barrière physique de la recombinaison. En effet, celle-ci induit une perte de linéarité de la mesure avec la dose, observable sur les détecteurs commerciaux actuels qui ne sont pas adaptés à ce nouveau type de fonctionnement.

Par ailleurs, à l'ESRF sur la ligne médicale ID17, utilisant des faisceaux de rayons X très intenses ($\sim 10^4$ Gy/s) d'énergie comprise entre 50 et 200 keV, une autre radiothérapie innovante est développée et repose sur un mode de délivrance de dose par fractionnement spatial. Il s'agit de la thérapie par microfaisceaux (MRT) qui implique une irradiation hétérogène des

tissus, avec des "pics" de très forte dose dans la trace des faisceaux ($< 50 \mu\text{m}$) 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. Les recherches pour la MRT sont menées à un stade pré-clinique (tests sur rats, souris de laboratoire, cochons nains en 2019 - 2020) et récemment un essai clinique vétérinaire sur des chiens a été entrepris. Cette technique émergente nécessite un développement méthodologique et médical approfondi. 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. Un contrôle qualité de l'irradiation peut donc être réalisé à l'aide d'un imageur portal, qui 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 DIAM-TECH à l'IN2P3 et IDSynchro à l'IDEX, il a été proposé de développer un détecteur diamant fonctionnant comme une chambre d'ionisation solide dont la surface active est constituée de diamants synthétiques obtenus par un procédé CVD (Chemical Vapour Deposition). Chaque diamant (8 disposés sous forme d'une barrette pour le détecteur final) est segmenté avec un pas des pistes adapté à la taille des faisceaux (pics et vallées en termes de maxima et minima de doses). L'électronique de lecture par intégration de courant est dérivée de celle de TraDeRa. Les mesures effectuées dans le cadre de la thèse de Nicolas Rosuel (2018-2021) ont montré la linéarité de la réponse des détecteurs diamant jusqu'à des débits de dose de 12 kGy/s dans les pics, la stabilité et la reproductibilité de la réponse dans le temps à l'échelle de 1%, et une comparaison entre les signaux mesurés et simulés en aval d'un fantôme anthropomorphique.

Enfin, les nouveaux accélérateurs destinés à des traitements par protons ou ions carbone (hadronthérapie) créent également la nécessité d'une surveillance très précise du faisceau avec un comptage rapide dans un environnement fortement radiatif.

Dans le cadre d'un contrôle en ligne par rayonnements secondaires, il est nécessaire d'étiqueter spatialement et temporellement chaque impulsion du faisceau, voire chaque ion incident, afin de synchroniser la détection des particules secondaires. C'est dans ce contexte qu'un hodoscope faisceau diamant pour l'hadronthérapie a été développé, placé en amont du patient. Le projet INCA CLaRyS-UFT (2017-2021) a proposé le développement d'un tel hodoscope pour



le monitoring du faisceau d'ARRONAX avec une application à la RT FLASH (figure 1). Les faisceaux utilisés sont des faisceaux de protons pulsés, avec une succession de trains ou “paquets de pulses” séparés dans le temps. Une des clés du projet est de pouvoir marquer en temps le début et la fin de chaque train d'impulsions et de pouvoir faire un comptage de particules dans le train d'impulsions ce qui donne une image de la dose, et s'adapter ainsi à la structure temporelle du faisceau qui peut être très variable selon le type d'accélérateur (cyclotron, synchro-cyclotron ou synchrotron).

La surface active du diamant est lue par une électronique discrète (à terme : intégrée) dédiée (faible bruit, grande capacité de comptage, résolution temporelle inférieure à la centaine de picosecondes). Cet hodoscope doit satisfaire les conditions imposées pour un

usage en proton thérapie et en carbone thérapie, ce qui implique : un taux de comptage de 100 MHz pour l'ensemble du détecteur (soit ~ 10 MHz par voie), une résolution temporelle de 100 ps rms, une résolution spatiale de 1mm (segmentation en pistes orthogonales sur chacune des faces, voir figure 1-C), une tenue aux radiations de 10^{11} protons/cm²/fraction soit $\sim 10^{14}$ protons/cm²/an, cette fluence étant 100 fois plus faible avec des ions carbone. On a pu démontrer, avec un premier prototype de détecteur, la linéarité de la mesure de la collecte de charges jusqu'à des intensités faisceau de l'ordre de 1 μ A mesurées sur diamant avec des diamants mono et polycristallins. Des mesures sous faisceaux de protons de 68 MeV à ARRONAX ont conclu à des résolutions temporelles très prometteuses (102 ps rms). Ces travaux ont donné lieu à deux publications principales [1, 2].

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

Collaboration CLaRyS – Projet CLaRyS-UFT

La collaboration CLaRyS (Contrôle en Ligne de l'hadronthérapie par Rayonnements Secondaires) regroupe des équipes de l'IP2I, du LPSC, du CPPM et de CREATIS. Le projet CLaRyS vise à la mise au point d'une gamma caméra par temps de vol (ToF), basée sur un hodoscope à fibres scintillantes, un ensemble de blocs scintillateurs BGO (configuration caméra multicollimatée), et plusieurs plans diffuseurs de détecteurs silicium à piste double face (configuration caméra Compton, voir figure 2). L'acquisition à haut débit est gérée par un système μ TCA. Les développements techniques se sont poursuivis à l'IP2I (thèse d'Oreste Allegrini) en parallèle à des travaux de simulation permettant de démontrer l'efficacité supérieure de la caméra Compton pour l'imagerie SPECT.

Le projet INCa-PCSI CLaRyS-UFT (2017-2021) a permis d'étudier expérimentalement et par simulation l'intérêt de la mesure de rayonnements secondaires à haute résolution temporelle, de l'ordre

de 100 ps rms, lorsqu'un étiquetage ion par ion est possible en hadronthérapie. Ce projet a permis la réalisation de l'hodoscope diamant décrit plus haut, qui a pu être testé sous faisceaux de protons à ARRONAX. L'efficacité de détection de protons uniques a été démontrée avec des détecteurs mono- et polycristallins (thèse Sébastien Curtioni 2017-2020). Une expérience de mesure de gamma prompts utilisant un moniteur faisceau diamant a démontré l'intérêt d'une haute résolution temporelle pour la technique de Prompt-Gamma Timing^[3] ce qui a constitué l'expérience de faisabilité du projet TIARA. Le contrôle du parcours par imagerie Compton peut lui aussi bénéficier d'une excellente résolution temporelle : en effet, l'identification de la position du faisceau par l'hodoscope permet de reconstruire la position du vertex d'émission en intersectant la direction de la trajectoire avec le cône obtenu par la détection Compton. Des simulations GATE ont montré que si l'information sur le ToF du proton incident et du photon détecté a une résolution inférieure ou égale à 200 ps rms, l'intersection ligne-cône peut être réduite à un seul point, voire permettre la réjection des deux points mal reconstruits dans le cas d'une absorption incomplète dans la caméra (figure 2). Un filtrage avec une résolution de 200 ps rms permet d'améliorer la précision sur la mesure du parcours des protons d'un facteur 2^[4].

Un détecteur commercial, la caméra Temporal delta, développée par Damavan Imaging, a été modifiée et testée en laboratoire et sous faisceau. La détection gamma dans un monobloc scintillant de CeBr est lue par une matrice de SiPM numériques à échantillonnage rapide, ce qui permet une mesure de l'énergie, du temps et de la position. La caméra a été adaptée pour la synchroniser avec un moniteur

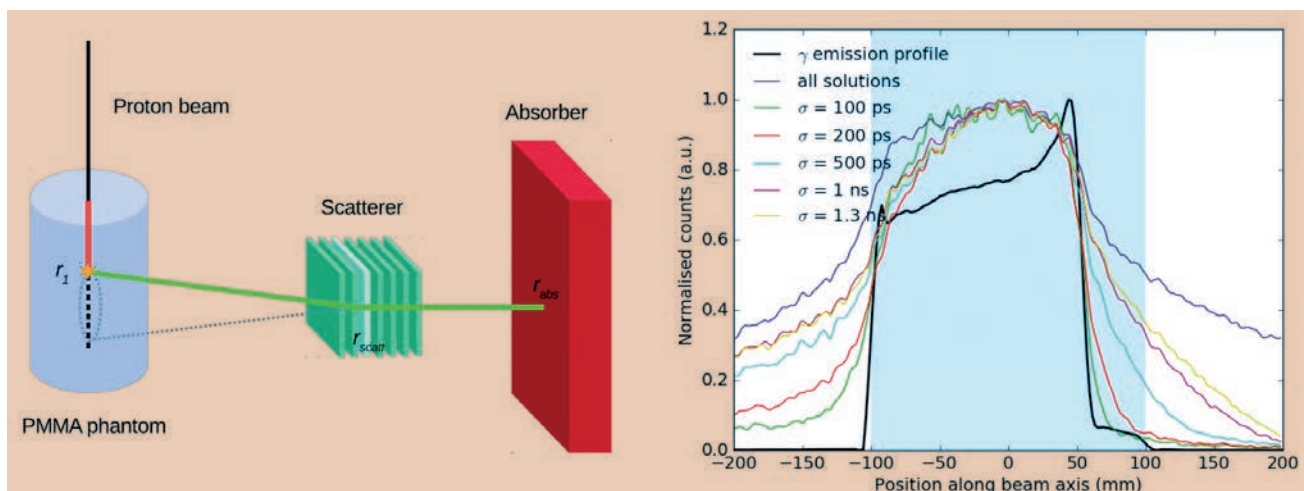


Figure 2. (Crédit [4]).

Gauche : principe de détection Compton d'un gamma prompt (en vert) émis par un proton dans une cible de plastique PMMA. Deux points constituent l'intersection entre la ligne et le cône Compton. Droite : simulation de profils gamma-prompts reconstruits en appliquant des filtres selon la résolution temporelle du système de détection pour des protons de 160 MeV.

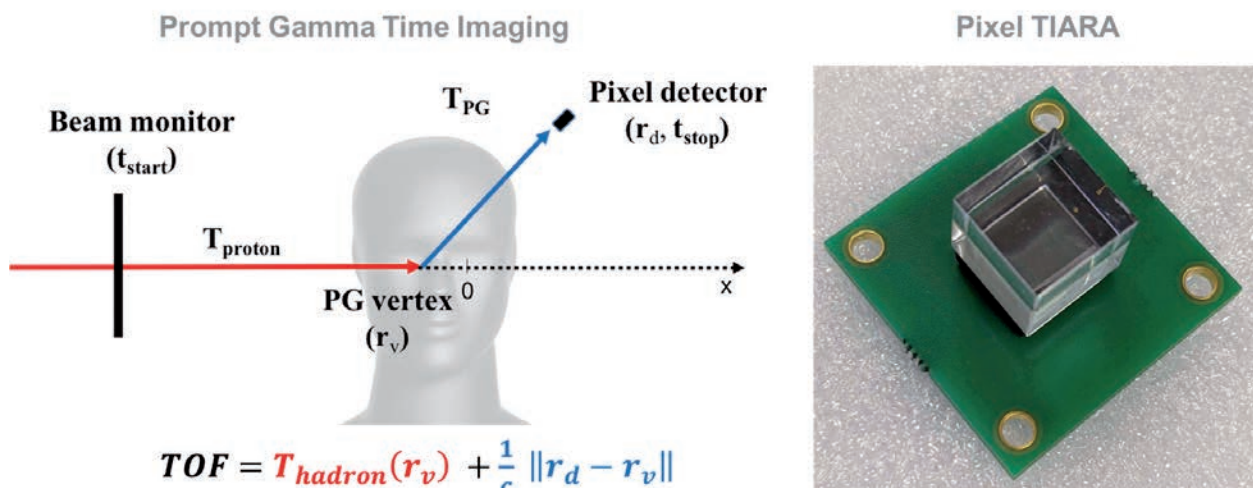


Figure 3. (crédit S. Marcatili, CNRS).

Avec la technique Prompt Gamma Time Imaging, la distribution de vertex gamma prompt est reconstruite par résolution d'un problème inverse à partir de la mesure exclusive du temps de vol du proton (par un moniteur faisceau) et du prompt gamma (par le détecteur TIARA). TIARA sera composé de 30 modules (pixels) basés sur des radiateurs Cherenkov afin d'obtenir une couverture 3D de la région anatomique irradiée. Avec une efficacité de détection de ~1% et une résolution temporelle de ~100 ps RMS, TIARA permettra de mesurer une variation millimétrique du parcours du proton avec une statistique limitée, dès le début du traitement.

faisceau diamant. Un test sous faisceau a été réalisé avec succès au CAL-Nice. Enfin, d'autres simulations menées dans le cadre du projet CLaRyS-UFT ont montré que i) le temps de vol ne permet pas d'améliorer la méthode d'Imagerie de Vertex d'Interaction de protons secondaire en carbone thérapie, et ii) le concept de radiographie protons par ToF est une alternative viable comparée à une technique par calorimétrie pour la mesure de l'énergie des ions transmis, au prix d'un compromis entre la longueur de vol nécessaire pour la mesure de ToF à résolution temporelle donnée, et le bruit induit par la dispersion en énergie. Un article de synthèse a été rédigé sur les résultats du projet CLaRyS-UFT [5].

Collaboration TIARA - Projet TIARA

Les excellentes performances de l'hodoscope faisceau diamant (figure 1) en termes de résolution temporelle ont permis d'envisager des solutions pour la détection de gamma prompts (GP) par mesure exclusive du temps de vol [3]. 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 du proton in-vivo et en temps réel (en quelques secondes au début du traitement).

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 un ou plusieurs photomultiplicateurs au silicium (SiPM). TIARA est lue en coïncidence temporelle avec un moniteur faisceau basé sur

diamant monocristallin pour permettre la mesure du temps de vol total du proton incident et du GP avec une résolution temporelle souhaitée de 100 ps RMS. La résolution d'un problème inverse permet de déterminer la distribution spatiale des sommets 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 protonthérapie de Nice (Centre Antoine Lacassagne).

Nous avons développé au LPSC un algorithme de reconstruction simplifié pour démontrer la faisabilité de la technique PGTI [6] : une résolution temporelle de 100 ps RMS permettrait d'atteindre une sensibilité de 1 mm (à 2σ) sur une variation du parcours du proton, avec une statistique correspondant à 10^8 protons incidents. Un algorithme de reconstruction 3D des données PGTI est en cours de développement au CPPM. Il permettra, à terme, d'obtenir une image 3D de la distribution des sommets GP.

Presque deux ans de R&D ont permis la réalisation d'un bloc détecteur TIARA qui remplit le cahier des charges en termes de résolution temporelle. Des tests sous faisceau de protons de 63 et 148 MeV ont permis de mesurer respectivement une résolution temporelle de 109 ps RMS et 147 ps RMS en coïncidence avec un diamant monocristallin. Avec ce module, une sensibilité de 4 mm (à 2σ) sur la mesure du parcours du proton a été obtenue avec une très faible statistique de 600 PG détectés. Ce résultat confirme la possibilité d'effectuer un monitoring en temps réel des traitements de protonthérapie avec le détecteur TIARA.

Modélisations biophysiques et dosimétrie : VHEE et radiothérapies ciblées

Un travail de modélisation biophysique multi-échelles (ex. figure 4) a démarré dans l'équipe depuis 2020 autour du développement de deux types de RT innovantes : les électrons de très haute énergie (VHEE, 100 – 300 MeV) et les RT ciblées.

Le premier aspect est une continuité d'un travail initié à l'IMNC et réalisé en collaboration avec l'Institut Curie, le LOA et le CHU de Lausanne. Les VHEE sont prometteurs de par leurs avantages dosimétriques en comparaison aux RX conventionnels et leur possible combinaison aux intensités FLASH ou à la dose fractionnée spatialement pour le traitement de tumeurs profondes. Avant de les utiliser sur patients, il est nécessaire de bien caractériser leur impact biologique sur les tissus, et développer des outils dosimétriques adaptés à ces faisceaux d'intensité élevée dans des pulses très courts (ns – fs). Nous

avons déterminé par la simulation l'efficacité biologique relative (EBR) théorique, les caractéristiques microdosimétriques, ainsi que le nombre et types de cassures d'ADN causées par les microfaisceaux VHEE, en les comparant notamment à d'autres faisceaux cliniques connus (électrons cliniques < 20 MeV, RX, protons, ions carbone). Il a été notamment montré que l'EBR des VHEE devrait être équivalente à celle des électrons cliniques (figure 4), bien que présentant un transfert d'énergie linéique supérieur, ce qui devrait faciliter l'implémentation rapide de ces faisceaux en clinique [7]. Enfin, deux séries d'études expérimentales menées entre 2018 et 2021 sur faisceaux d'électrons intenses ont visé à déterminer la réponse cellulaire sous faisceaux d'électrons laser-plasma femtoseconde avec contrôle dosimétrique, et de déterminer les facteurs de correction de recombinaison pour l'utilisation d'une chambre à ionisation commerciale en débits de dose FLASH. Ces travaux ont donné lieu à cinq articles de revue publiés entre 2020 et 2022.

Le deuxième aspect concerne deux types de RT ciblées 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 (~6-90 μm) très agressifs, soit directement via un radionucléide émetteur alpha (radiothérapie interne vectorisée, RIV- α), soit en activant le bore contenu dans le vecteur par un champ neutronique

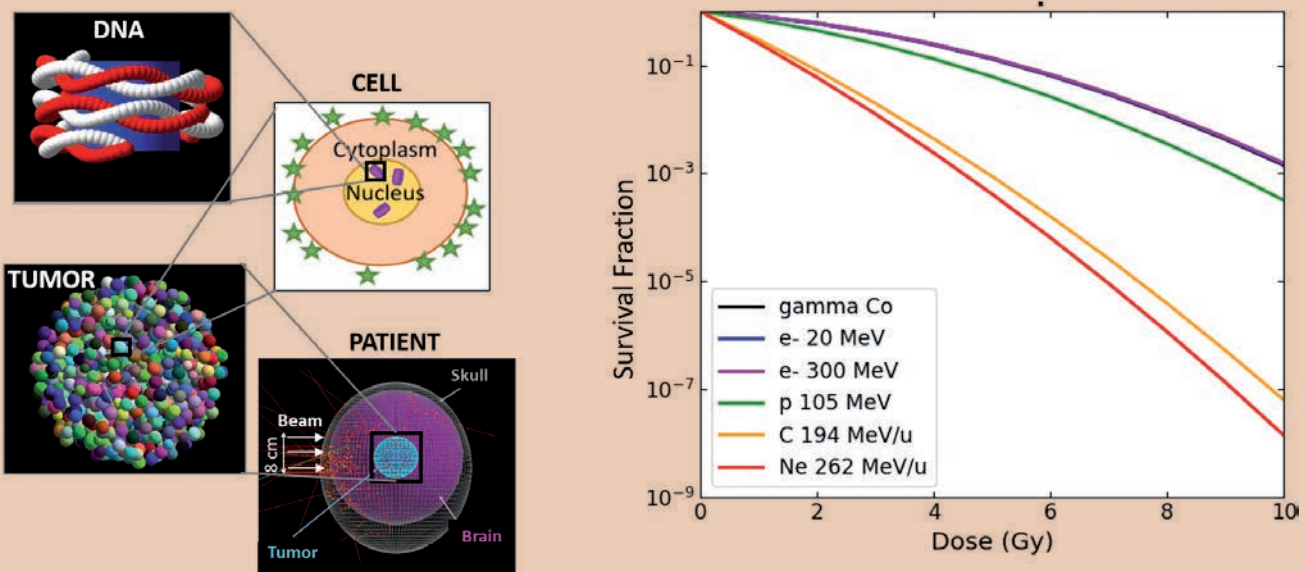


Figure 4. (Crédit R. Delorme, CNRS et [7]).

Gauche : exemple de modélisations biophysiques multi-échelles réalisées par simulations Monte Carlo (GATE, Geant4-DNA) allant de l'ADN au patient. L'objectif est à la fois de simuler de manière réaliste des conditions de traitement par un type de radiothérapie innovante à l'échelle macroscopique et considérer les interactions physiques et dégâts biologiques produits aux échelles micro- et nano-métriques. Droite : exemple de survies cellulaires théoriques résultant de ce type de modélisations multi-échelles, représentant ici la place des VHEE par rapport à d'autres faisceaux cliniques [7].

(BNCT). Ces thérapies induisent une hétérogénéité de dose micrométrique 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, démarré début 2021 et mené en collaboration avec l'IP2I, qui vise à fournir des outils de modélisation et de prédiction d'effets biologiques pour ces deux thérapies. En particulier il devra permettre d'adapter le modèle biophysique NanOx pour les basses énergies d'ions, et répondre à la problématique des échelles (ADN, cellule, tissus...) et 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 réalise sa thèse

(2021-2024) sur la prédiction de réponse thérapeutique en RIV- α . Il a pu démontrer que l'hétérogénéité de distribution intra-cellulaire du vecteur impactait peu la réponse tumorale pour des tumeurs de + de 50 μ m de rayon, indépendamment du radionucléide choisi (énergie alpha), mais devenait très impactante pour des concentrations de radionucléides faibles (< 10 désintégrations par cellule), un article est en cours. Enfin, Maria Pedrosa Rivera (2021-2023) dédie son postdoc à la faisabilité d'expériences de radiobiologie sur la plateforme ALTO (IJCLab), visant à fournir les données de survies cellulaires en ions ^4He et ^7Li nécessaires à l'adaptation du modèle biophysique NanOx pour ces thérapies, et aux modélisations appliquées à la BNCT.

Physique nucléaire

Les recherches dans ce domaine relèvent tout d'abord d'une activité en physique des détecteurs. Les performances des détecteurs diamant ont été évaluées auprès du spectromètre de masse LOHENGRIN à l'ILL (l'Institut Laue Langevin de Grenoble). Il s'agit là d'une expérience pour évaluer les capacités du diamant à détecter les particules à faible parcours (qui s'arrêtent dans les premiers microns d'épaisseur du diamant), et, qui plus est, dans le cas des fragments issus de la fission (FF) de l'uranium ^{235}U , déposent un grand nombre de charges.

Ce travail a été effectué dans le cadre d'une collaboration LPSC, ILL, INFN Milan, IFJ-PAN (Cracovie). L'objectif scientifique dans l'appréciation des performances du matériau diamant est d'effectuer des mesures de spectroscopie fine et d'apprécier le défaut de hauteur d'impulsion PHD pour Pulse Height Defect, dont il a été prouvé qu'il était largement présent dans les détecteurs silicium. Le PHD est défini comme la différence observée entre l'énergie de la particule incidente (connue) et l'énergie dérivée du signal électrique (mesurée sur le détecteur diamant) et ce défaut a un impact sur les mesures en énergie.

Deux diamants monocristallins, trois polycristallins et un diamant sur iridium ainsi qu'un détecteur en carbure de silicium ont été caractérisés comme chambre d'ionisation à l'état solide pour la détection de FF [8]. Les mesures de résolution en temps ont été effectuées avec un détecteur diamant monocristallin de 500 μ m d'épaisseur lu par un amplificateur à large bande. Une résolution temporelle de 10,2 ps RMS

a été obtenue pour un FF avec une masse $A = 98$ à une énergie cinétique de 90 MeV à l'aide d'un préamplificateur de charge développé à l'INFN-Milan. La résolution en énergie mesurée pour le même FF s'est avérée légèrement meilleure pour un détecteur de diamant monocristallin fin de ~ 50 μ m ($\sim 1,4$ % RMS) que pour celui de 500 μ m d'épaisseur ($\sim 1,6$ % RMS), tandis qu'une valeur de 3,4 % RMS a été obtenue avec le détecteur en carbure de silicium de 400 μ m. La comparaison avec les résultats des mesures α et tritons nous a permis de conclure que le PHD entraîne une perte d'environ 50 % des porteurs de charge générés initialement pour les FF.

Ces observations ont donc mené à la conception de deux types de détecteurs.

Un télescope ΔE -E monolithique en diamant pour l'identification de particules chargées (collaboration LPSC- NEEL, codirection thèse Alexandre Portier 2019-2022 financement IDEX-UGA DIATEL). L'étage ΔE 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 actuel de DiamFab, la start-up de l'institut NEEL, en particulier sur son procédé de croissance CVD d'une couche épitaxiée mince (quelques μ 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 est en phase de tests en 2022 sur un banc au LPSC, exposé à une source alpha d'énergie 5,5 MeV. L'analyse des résultats est en cours.

Un système de trigger/veto sur la fission (expérience FIPPS à l'ILL, collaboration LPSC équipes PNAM et Physique des Réacteurs, ILL INFN-Milan IFJ-PAN-Cracovie). FIPPS est un spectromètre gamma pour l'étude des noyaux riches en neutrons. Pour ce système trigger, une cible d'élément fissile placée dans un champ neutronique issu du réacteur sera déposée sur un diamant (instrumentation et design : LPSC et sous-traitance plateforme NANO-FAB de l'institut NEEL, cible fissile : ILL). L'objectif est d'obtenir une signature temporelle d'un événement de fission induite par les neutrons thermiques délivrés par le réacteur ILL (Grenoble). On cherche à exploiter ici les excellentes performances en termes de résolution temporelle du diamant.

Un autre aspect des recherches menées en physique nucléaire concerne la physique théorique. Les recherches dans ce domaine 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 dans les isotopes du cérium. Nous sommes principalement intéressés par les symétries de point critique $E(5)$ et $X(5)$ du triangle de Casten. 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.

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 $X(5)$, on s'attend à observer une structure de bosse typique dans les calculs de la PEC en fonction du paramètre de déformation 9,10 . 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.

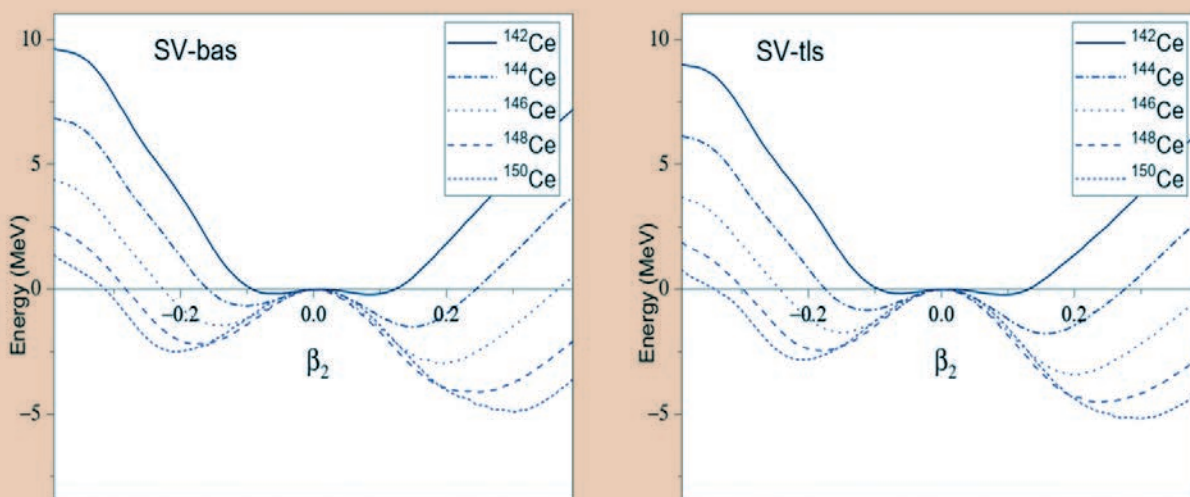


Figure 5. (crédit [10]).

Courbe d'énergie potentielle (PEC) spécifique en fonction du paramètre β_2 pour les isotopes du cérium et deux paramétrisations de l'approche Skyrme-Hartree-Fock (SHF) : SV-bas (gauche) et SV-tls (droite).

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- Développement d'un démonstrateur d'hodoscope faisceau en diamant pour le contrôle en ligne du parcours des ions en hadronthérapie, Sébastien Curtoni, Université Grenoble Alpes, 2020, <http://www.theses.fr/2020GRALY045>
- Monitoring en ligne de la radiothérapie par rayonnement synchrotron à l'aide de détecteurs diamant, Nicolas Rosuel, thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2021. <https://www.theses.fr/s211637>

Principales publications

1. X-ray Beam Induced Current analysis of CVD diamond detectors in the perspective of a beam tagging hodoscope development for hadrontherapy on-line monitoring, M.-L. Gallin-Martel, S. Curtoni, S. Marcatili, L. Abbassi, A. Bes, G. Bosson, et al., Diamond & Related Materials (2020) 108236, <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108236>. hal-03150914
2. Performance of CVD diamond detectors for single ion beam-tagging applications in hadrontherapy monitoring, S. Curtoni, M.-L. Gallin-Martel, L. Abbassi, A. Bes, G. Bosson, J. Collot, et al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, (2021), <https://arxiv.org/abs/2105.05053>. hal-03227464
3. Ultra-fast prompt gamma detection in single proton counting regime for range monitoring in particle therapy. S. Marcatili, J. Collot, S. Curtoni, D. Dauvergne, J.Y. Hostachy, C. Koumeir, et al., Phys.Med.Biol., 65(24):245033, 2020. doi: 10.1088/1361-6560/ab7a6c. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02467231>. hal-02467231
4. Influence of sub-nanosecond time of flight resolution for online range verification in proton therapy using the line-cone reconstruction in Compton imaging, J. Livingstone, D. Dauvergne, A. Etxebeste, M. Fontana, M.-L. Gallin-Martel, B. Huisman, et al., Phys. Med. Biol. 66 (2021) 125012, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02467231>. hal-03257804
5. On the role of single particle irradiation and fast timing for efficient online-control in particle therapy, D. Dauvergne, O. Allegrini, C. Caplan, X. Chen, S. Curtoni, A. Etxebeste, M.-L. Gallin-Martel, et al., Frontiers in Physics 2020, 8:567215. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.567215>. hal-02939215
6. A time-of-flight-based reconstruction for real-time prompt-gamma imaging in proton therapy. M. Jacquet, S. Marcatili, M.-L. Gallin-Martel, J.-L. Bouly, Y. Boursier, D. Dauvergne, et al., Phys. Med. Biol., 66(13):135003, 2021. doi: 10.1088/1361-6560/ac03ca. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03319261>. hal-03319261
7. First theoretical determination of relative biological effectiveness of very high energy electrons, R. Delorme, T.A. Masilela, C. Etoh, F. Smekens and Y. Prezado. (2021), Scientific Reports, (2021) 11:11242. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90805-3>. hal-03242669
8. Characterization of Diamond and Silicon Carbide Detectors With Fission Fragments, M. L. Gallin-Martel, Y. H. Kim, L. Abbassi, A. Bes, C. Boiano, S. Brambilla, et al., Front. Phys., 20 September 2021 | <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.732730>
9. Macroscopic and microscopic description of phase transition in cerium isotopes. P. Alexa, M. Abolghasem, G. Thiamova, D. Bonatsos, T.R. Rodriguez, and P.-G. Reinhard. Accepted in Phys/Rev. C.
10. Macroscopic and skyrme-hartree-fock test of E5 symmetry in xenon isotopes, M. Abolghasem, B. Cuxac, G. Thiamova and P Alexa, PHYSICA SCRIPTA 95, 034010, (2020). <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab51ec>

NEUTRONS POUR LA SCIENCE ET LA SOCIÉTÉ (PROJET TRANSVERSE)

Hormis le domaine spécifique des études nucléaires (réacteurs, physique nucléaire, métrologie neutron, etc.), les neutrons sont utilisés pour l'imagerie, le dopage par transmutation, la production d'isotopes ou une thérapie par capture neutronique pour lutter contre le cancer. Ces applications demandent des forts flux de neutrons ($> 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$) de basse énergie ($< 10 \text{ keV}$). Ces sources de neutrons (CANS : Compact Accelerator Neutrons Sources), contrairement à celle des réacteurs, peuvent être pulsées et mieux adaptées aux besoins des applications. Le principe de la thérapie par capture neutronique (NCT : Neutron Capture Therapy) est d'introduire à l'intérieur des cellules tumorales, par des vecteurs spécifiques et sélectifs, des molécules comportant des noyaux de ^{10}B , qui ont une très grande section efficace de capture (≈ 3840 barns) pour les neutrons thermiques. Des particules α et des noyaux de ^7Li sont produits lors de la réaction de capture $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, délivrant localement des doses létales aux tissus tumoraux.

Équipe de recherche : membres permanents

Daniel Santos (responsable), Véronique Ghetta, Sébastien Chabod, Rachel Delorme.

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Marine Hervé (10/2017-03/2021) - doctorante.

Personnels des services techniques

Nadine Sauzet, Olivier Guillaudin, Jean-François Muraz (Service Détecteurs et Instrumentation), Julien Giraud (Service Études et Réalisations Mécaniques).

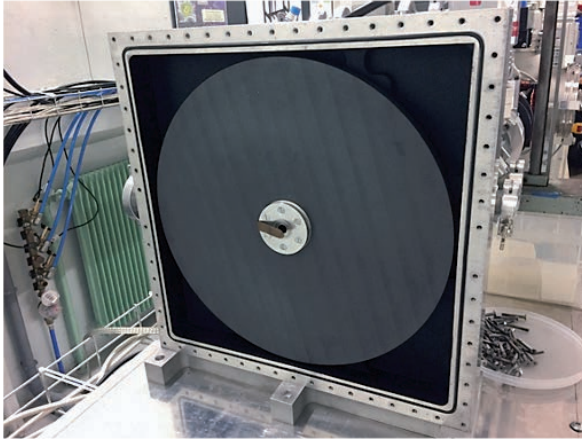
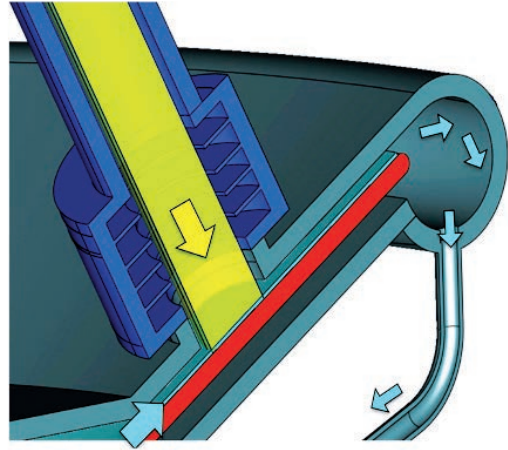


Figure 1. (crédit J.F. Muraz, CNRS et J. Giraud).

Gauche : Photo de la roue en graphite sur laquelle on déposera le dépôt de Béryllium.
Droite : Schéma de la cible de lithium liquide.



Développement de cibles

Les cibles doivent supporter de très fortes puissances (15-50 kW) concentrées sur des petites surfaces ($\approx 10 \text{ cm}^2$). Leur conception représente un réel défi technologique. Les réactions les plus adaptées pour la production des neutrons sont : ${}^9\text{Be}(p, n){}^9\text{B}$, ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ et ${}^7\text{Be}(p, n){}^7\text{Be}$ avec des faisceaux d'énergie entre 1,5 et 3 MeV. L'équipe du LPSC conçoit et

développe deux solutions originales pour des cibles du type ${}^9\text{Be}$ et ${}^7\text{Li}$.

Cible de béryllium et cible de lithium liquide

La cible de béryllium est constituée par une matrice de graphite tournante de 30 cm de diamètre servant à la fois de matériau de structure et de massif dissipatif de la chaleur engendrée par le dépôt d'énergie du faisceau de deutons ou protons. À la surface de la matrice de graphite, une fine couche de Béryllium de $8 \mu\text{m}$, voir figure 1 gauche. Une cible de lithium liquide, voir figure 1 droite, a été également étudiée et a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

Ligne expérimentale de tests thermiques

Un banc de test thermique capable de produire un faisceau d'électrons de 3 kW sur 1 cm^2 de surface a été développé. Les électrons, produits au sein d'une source ECR de type COMIC, sont extraits du plasma d'argon et accélérés à une énergie de 20 keV pour un courant total de 150 mA.

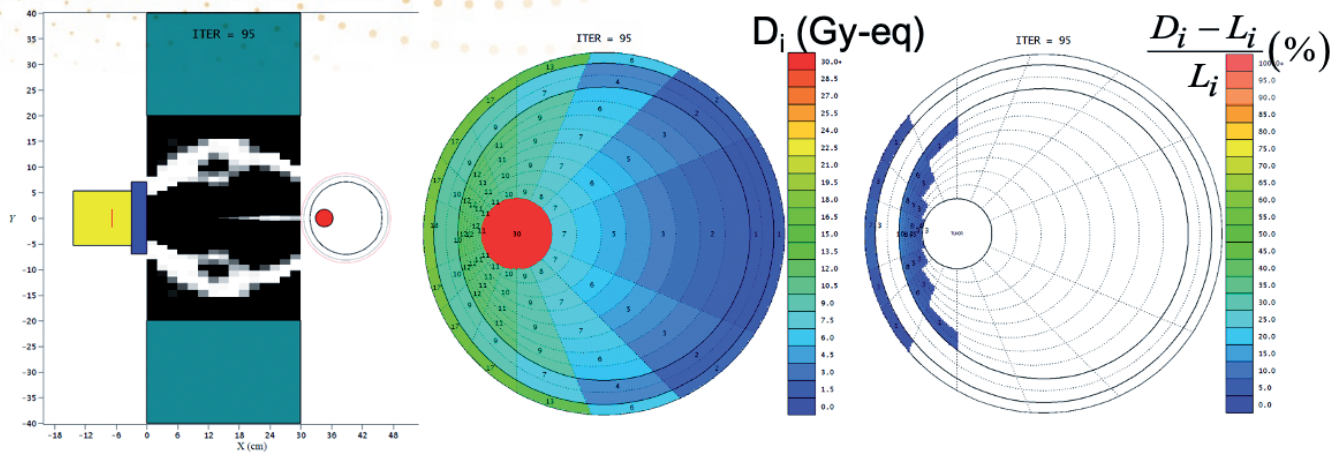


Figure 2. (Crédit S. Chabod, CNRS).

Modérateur optimal en eau lourde pour la réaction ${}^9\text{Be}(d,n)$ caractérisée dans [1] à gauche avec la dose déposée par régions dans le cerveau au centre et son pourcentage relatif à droite.

Caractérisation de champs neutroniques

Mesure spectrale du champ neutronique produit par la réaction ${}^9\text{Be}(d,n)$ avec MIMAC-FastN à Legnaro (Italie)

Une expérience a été faite à Legnaro (Italie) en collaboration avec l'équipe argentine du laboratoire Tandem (Buenos Aires) et les équipes de l'INFN, de l'Université de Seville (Espagne) et de l'IRSN-Cadarache afin de mesurer la distribution angulaire et spectrale du champ neutronique de la réaction proposée pour l'AB-nCT (Accelerator-Based Neutron Capture Therapy). L'analyse de données a donné lieu à un article en 2019 [1].

Modération du champ neutronique rapide produit sur la cible

Les neutrons produits au niveau de la cible ont des énergies de l'ordre de quelques MeV. Afin de produire un champ épithermique d'une énergie inférieure à 10 keV, on doit développer des modérateurs autour de la cible. Ces champs neutroniques pourront être caractérisés par le détecteur Mimac-FastN (voir partie valorisation MIMAC).

Caractéristiques du modérateur optimal à eau lourde

La thermalisation du spectre neutronique rapide issu de la cible est effectuée grâce à un modérateur afin de

produire un champ épithermique approprié au traitement. L'AIEA recommande une dose équivalente sur les tissus sains inférieure à 11 Gy-Eq et supérieure à 40 Gy-Eq sur la tumeur pour assurer l'efficacité du traitement. Un flux de 10^9 n/cm².s est conseillé pour assurer un traitement de moins d'une heure au patient.

Le modérateur développé au LPSC, par un algorithme optimal de Sébastien Chabod, est montré sur la figure 2. La forme qui n'est pas du tout intuitive optimise le nombre de captures sur la tumeur en minimisant la dose secondaire sur les tissus sains du cerveau et la peau.

Évaluation du nombre de captures sur la tumeur en fonction de la profondeur dans le cerveau

Des simulations Monte Carlo ont été réalisées avec le code de calcul MCNP6. La tumeur est irradiée par un champ neutronique mono-énergétique sous la forme d'un disque de 1,5 cm de rayon. L'observable d'intérêt ici est le nombre de captures sur la tumeur par seconde et par unité de volume. L'objectif est de comparer les résultats obtenus à faible énergie (entre 10 et 1000 eV) avec ceux obtenus pour 10 keV puisque cette énergie représente l'énergie limite haute du domaine épithermique [1 eV - 10 keV], recommandée pour le traitement des tumeurs non-superficielles. À énergie fixée, le taux de captures sur la tumeur diminue lorsque la profondeur augmente. Pour chaque profondeur, on observe un taux de captures plus important à énergie plus faible : le nombre de captures sur la tumeur augmente lorsque l'énergie diminue. Pour une même intensité source on obtient donc une dose plus importante à des énergies inférieures à 10keV. Les résultats sont présentés dans [2].

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- Caractérisation de champs neutroniques rapides et épithermiques pour thérapie par capture neutronique basée sur accélérateurs, Marine Hervé, 19/03/2021. Dirigée par D. Santos, <https://www.theses.fr/2021GRALY010>

Principales publications

1. *Neutron spectrometry of the ${}^9\text{Be}(d(1.45\text{ MeV}),n){}^{10}\text{B}$ reaction for accelerator-based BNCT.* M.E Capoulat, N. Sauzet, O. Guillaudin, D. Santos et al. NIM B, vol.445, pp 57-62, 2019. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02073512>
2. *On the Epithermal Neutron Energy Limit for Accelerator-Based Boron Neutron Capture Therapy (AB-BNCT): Study and Impact of New Energy Limits,* Marine Hervé, Nadine Sauzet, Daniel Santos, Physica Medica 88 (2021), 148-157. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1120179721002386>

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 (ECR) 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.

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 comme SPIRAL2 et NEWGAIN au GANIL, MYRRHA au SCK-CEN ou encore SPES2 en Italie. À travers ces collaborations, plusieurs axes d'étude et de recherche amont ont récemment été initiés comme la simulation du plasma dans une source ECR, la compréhension de phénomènes spécifiques dans les structures accélératrices ou encore l'étude de compensation de pannes dans les LINAC.

L'activité de recherche de l'équipe 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.

D'une manière générale, 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, le 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, GDRI-NMC) menés en partenariat avec différents groupes de recherche nationaux ou bien 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 sous-systèmes d'accélérateurs. 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 les sources d'ions à la résonance cyclotronique électronique (RCE) pour la production d'ions multichargés et la multi-ionisation des faisceaux. Dans le cadre de collaborations nationales et internationales, le pôle est engagé dans des grands projets d'accélérateurs comme SPIRAL2 et MYRRHA. Pour ses développements expérimentaux, le pôle s'appuie sur les compétences des services techniques du LPSC et bénéficie de financements notamment de l'ANR (EQUIPEX+).

Équipe de recherche : membres permanents

Julien Angot, Maud Baylac (responsable du pôle), Frédéric Bouly, Benjamin Cheymol, Jean-Marie De Conto, Yolanda Gómez-Martinez, Christophe Peaucelle, Thomas Thuillier.

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Thomas André (post-doctorant), Bichu Bashkar (doctorant), Mathieu Debongnie (doctorant), Alexandre Leduc (doctorant), Antonio Méndez-Giono (doctorant), Julien Michaud (doctorant), Adrien Plaçais (post-doctorant).

Équipe technique: membres permanents

Laurent Bonny, Thierry Cabanel, Emmanuel Froidefond, Etienne Labussière, Myriam Migliore, Patrick Sole, Solenne Rey.

Personnels des services techniques

Pierre-Olivier Dumont, Mathieu Da Silva (Service Études et Réalisations Mécaniques), Éric Lagorio (Service Électronique), Olivier Zimmerman (Service Détecteurs Instrumentation).

Source d'ions lourds : PHOENIX-V3

Le LPSC a conçu, construit et testé une version améliorée de la source d'ions PHOENIX pour le projet SPIRAL2. La source, installée au GANIL depuis 2019, doit fournir des faisceaux d'ions multichargés à une tension d'extraction de 60 kV, sans plateforme haute tension et avec un rapport masse sur charge $A/Q=3$. Ces deux spécifications sont extrêmement contraignantes. Cette source, PHOENIX-V3, a rempli ses promesses en doublant les intensités d'ions produits par rapport à sa version précédente (V2) : 120 $\mu\text{A Ar}^{14+}$, 38 $\mu\text{A Ni}^{19+}$, 32 $\mu\text{A Ca}^{16+}$. Ces intensités répondent au besoin des expériences de physique

du GANIL pour qualifier leurs instruments. Des faisceaux de calcium ont été produits grâce à un nouveau four de hautes performances (intensité et fiabilité) développé au LPSC.

Afin de ne pas contaminer le LINAC pendant sa qualification, la source PHOENIX-V3 a été utilisée pour produire de fortes intensités d' He^{2+} à 40 kV, permettant de simuler l'accélération d'ions D^+ normalement produits par la source SILHI du GANIL. Ce faisceau, non prévu dans le cahier des charges de la source et très loin du mode d'opération normal de la source, a pu être produit jusqu'à hauteur de 4 mA d'intensité et a permis de valider les réglages du LINAC. Le transfert de responsabilité de la source vers le GANIL a été acté le 31 décembre 2021. Le LPSC continue à suivre le fonctionnement de la source et apporte son expertise au GANIL lorsque cela est nécessaire.

Source d'ions lourds supraconductrice

Le laboratoire est impliqué dans le projet de construction du nouvel 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/u dans l'accélérateur linéaire (LINAC) de SPIRAL 2 [1]. Financé en 2021 par un EQUIPEX+ de l'ANR (avec le GANIL, le CEA et les laboratoires IPHC, IJCLab, LP2IB et LPC Caen), le projet étudie une source d'ions, une ligne 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*, 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. L'interaction entre le plasma et la paroi de la chambre à plasma, la conception mécanique de la source (chambre à plasma, injection des atomes) ainsi que l'étude conceptuelle des instruments ont débuté au LPSC avec le soutien des services de mécanique, d'électronique et du SDI.

* ASTERICS est l'acronyme de : Advanced Spiral Two Electron cyclotron Resonance Ion source at Caen with Superconducting magnet.

Simulation du Plasma de source d'ions Multichargés : SPIM

Le projet SPIM (Simulation du Plasma de source d'Ions Multichargés) a débuté en 2019 grâce à un financement MITI-80 PRIME du CNRS. La recherche s'effectue en collaboration entre le LPSC et une équipe du laboratoire de physique des gaz et des plasmas (LPGP) d'Orsay. Le projet consiste à modéliser la formation du faisceau d'ions extrait du bord du plasma d'une source d'ions à la résonance cyclotronique électronique (RCE), puis de mener des mesures

expérimentales comparatives au LPSC sur la source d'ions PHOENIX V2 [2]. Ce projet fait l'objet de la thèse de José-Antonio Méndez-Giono. Des détecteurs innovants sont aussi développés pendant le projet pour mesurer l'émittance transverse en 4 dimensions des faisceaux d'ions issus de la source, ainsi

que le spectre en énergie des électrons s'échappant du plasma. Un objectif important est de confronter simulations et expériences afin de mieux comprendre la formation des faisceaux d'ions en sortie de source, ce qui permettra sur le long terme de concevoir les futurs accélérateurs de particules.

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

SEISM (Sixty GHz ECR Ion Source using Megawatt Magnets) est une source d'ions, basée sur la résonance cyclotronique électronique, alimentée par une micro-onde à très haute fréquence (60 GHz) [3]. L'objectif de ce prototype unique au monde est d'étudier la formation, l'extraction, le transport et la qualité des faisceaux d'ions produits par un tel instrument. La recherche fondamentale menée sur cette source ambitionne de répondre aux besoins des accélérateurs du futur, avec des intensités extrêmes de courant d'ions.

Ce prototype repose sur une géométrie magnétique simple, dite en "cusp", exploitant deux jeux de deux bobines dont les champs s'opposent. Pour ce projet, nous avons opté pour des bobines polyhélices, développées par le Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses (LNCMI) de Grenoble pour générer le champ magnétique et la surface RCE fermée à 2,1 T. Le plasma est entretenu par des impulsions micro-ondes de forte intensité produites par un

gyrotron pulsé (300 kW). Les précédentes expériences au LNCMI ont démontré avec succès l'établissement du champ magnétique nominal et l'extraction de faisceaux d'ions avec une densité de courant jusqu'à $\sim 1\text{A}/\text{cm}^2$. La présence de fortes intensités de courant d'ions à la fin de l'impulsion ("afterglow") a également été observée, prouvant l'existence d'un confinement des ions dans une source RCE en configuration "cusp".

Depuis 2019, les bobines, qui avaient été endommagées en 2014, ont été reconstruites. De plus, une nouvelle ligne de transport a été installée pour améliorer le transport du faisceau : elle est composée d'un triplé de quadripôles de grand diamètre ($\varnothing 160\text{ mm}$) et d'un dipôle de déviation à 90° (90 mm d'ouverture). On trouve aussi des diagnostics de faisceau tels que des coupelles de Faraday pour la mesure du courant et un système de poivrière ("pepperpot") pour mesurer l'émittance du faisceau d'ions produit (voir figure 1).

Plusieurs campagnes expérimentales ont été effectuées en 2021 afin de valider la tenue en courant des nouvelles bobines mais aussi pour qualifier les impulsions HF produites par le gyrotron. Fin 2021, les premiers faisceaux d'ions ont été produits et transportés sur l'intégralité de la ligne. Ces résultats préliminaires sont très encourageants et ouvrent la voie à un programme expérimental ambitieux sur des faisceaux de très haute intensité.

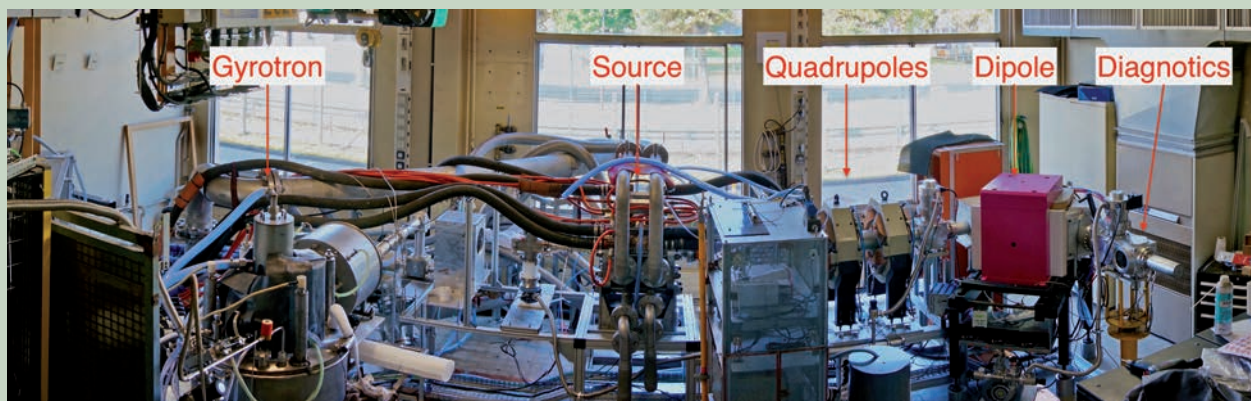


Figure 1. (crédit : T. André, LPSC/CNRS).

Implantation de la source d'ions SEISM au laboratoire LNCMI. De gauche à droite : Gyrotron (60 GHz) et sa ligne de faisceau de micro-ondes, source d'ions SEISM, triplet de quadripôles (gris), dipôle (rose), diagnostics de faisceau.

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-acceler 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^[4].

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.

Le projet MYRRHA

Initié par le SCK-CEN de Belgique, le projet MYRRHA vise la construction d'un réacteur hybride (ou ADS) de recherche, à Mol, afin d'étudier la transmutation de certains déchets nucléaires. Il requiert un accélérateur linéaire de haute énergie (600 MeV) fournissant un faisceau continu d'intensité élevée

(4 mA). Cet accélérateur exige un niveau de fiabilité unique au monde : moins de 10 arrêts du faisceau de durée supérieure à 3 secondes par cycle opératoire de 3 mois. En 2018, le gouvernement belge a annoncé le financement de la phase I du projet avec la construction du linac jusqu'à 100 MeV et des zones expérimentales associées. Dans le cadre d'un contrat de collaboration IN2P3/SCK-CEN, le LPSC est engagé dans des études de physique du faisceau et des activités de R&D.

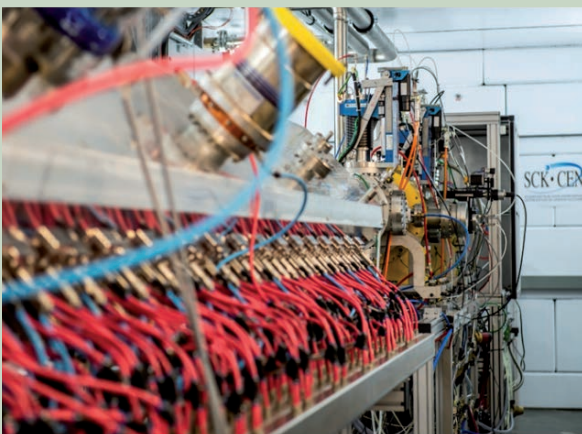
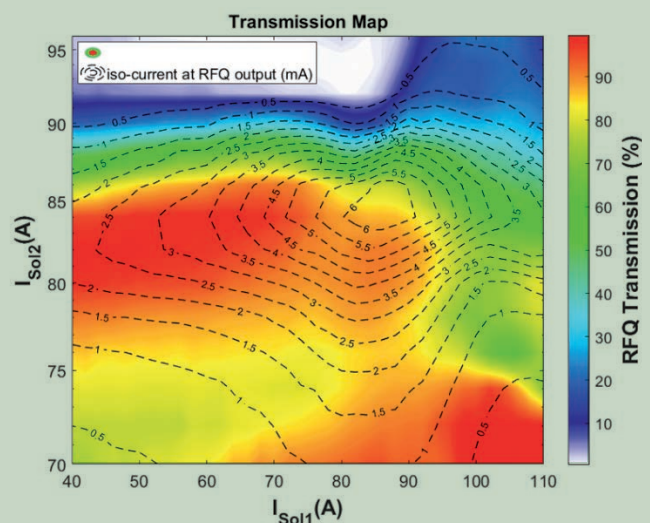


Figure 2. (Crédit A. Gatera (SCK)/F. Bouly (LPSC/CNRS)).

Gauche : l'injecteur de MYRRHA installé à Louvain-La-Neuve avec au fond, la source et la LEBT et au premier plan, le RFQ et son système de refroidissement. Droite : mesure de la transmission du faisceau (en %) dans le RFQ en fonction du courant dans les bobines des solénoïdes (la force de focalisation) de la LEBT. Les lignes "iso-courant" en pointillés indiquent la valeur du courant faisceau (en mA) à la sortie du RFQ.



L'objectif de fiabilité de MYRRHA nécessite de s'assurer de la bonne qualité du faisceau afin de limiter les pertes dans l'accélérateur. Le rôle crucial de l'injecteur est de transporter et de conditionner le faisceau depuis la source de protons vers le linac supraconducteur. Le LPSC a développé, construit et qualifié la ligne basse énergie (LEBT), premier maillon de cet injecteur. La LEBT a ensuite été couplée à la suite de l'injecteur, en particulier au quadripôle radiofréquence (RFQ), sur le site de Louvain-la-neuve au SCK-CEN. Le pôle a effectué l'installation de la LEBT en Belgique, puis participé au démarrage et aux réglages de l'injecteur (voir figure 2).

Le pôle assure également la coordination des études de dynamique faisceau, menées par l'IN2P3, pour le design global de l'accélérateur. Nous menons également des études spécifiques de physique du faisceau pour la compensation des pannes et l'optimisation des réglages de l'accélérateur (cf. Partie Fiabilité et optimisation) [5].

Par ailleurs, des diagnostics performants et fiables sont indispensables au vu de la puissance faisceau. Le pôle développe des instruments qui permettront de mesurer le profil du faisceau de protons pour une gamme d'énergie allant de 15 à 600 MeV. Le prototype de "wire scanner" avec son électronique d'acquisition et de contrôle sera testé au LPSC.

Le pôle étudie le dimensionnement des systèmes de vide du linac. Les systèmes de pompage ont été modélisés suite aux calculs des conductances et des flux de dégazages. Les résultats permettent d'orienter et de

valider les choix technologiques des systèmes ultravides.

Nous sommes impliqués dans le développement des cavités supraconductrices Spoke, mené par l'IJCLab, dont 60 exemplaires équiperont la première section du linac. Une cavité RF supraconductrice est sensible à diverses perturbations (vibrations, pression, forces de Lorentz...). Ces perturbations, produisant un désaccord important de la fréquence de résonance de la cavité, imposent le recours à un système de compensation composé d'éléments piézo-électriques et électroniques. Cet ensemble de régulation en fréquence a été conçu et réalisé par le service électronique du LPSC.

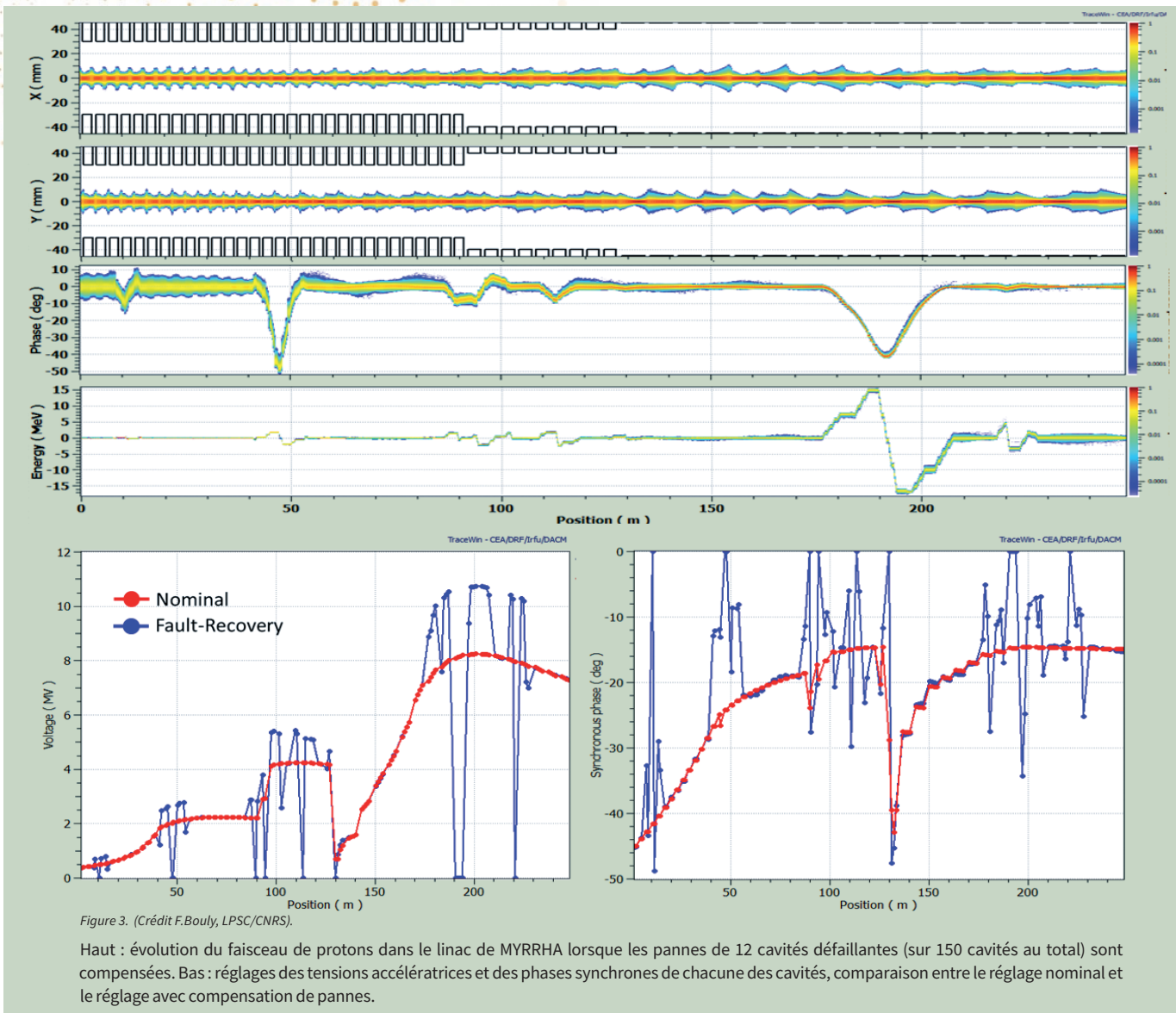
Le pôle et le service mécanique du LPSC ont assuré la conception et le suivi de fabrication de six prototypes de coupleurs RF de puissance. Le coupleur permet le transfert de la puissance RF (ici avec une efficacité supérieure à 99,7%) de l'amplificateur à la cavité accélératrice. Même si la puissance à transférer dans le mode fonctionnement nominal est modeste (dizaine de kW à 352.2 MHz), les exigences sur la fiabilité l'accélérateur imposent un dimensionnement du coupleur pour une puissance de 80 kW [6]. Le coupleur assure aussi l'étanchéité entre le vide secondaire dans la cavité (10^{-8} mbar) et l'air ambiant. Il compense les efforts liés à la mise sous vide et aux dilatations thermiques (T° cavité : 2 K) et minimise le transfert de chaleur sur les cavités cryogéniques supraconductrices. La fabrication des prototypes s'est achevée en 2020 : 4 coupleurs ont été conditionnés à l'IJCLab et installés sur les cavités pour les essais des cryomodules.

Fiabilité et réglage des accélérateurs

Le pôle mène des travaux pour optimiser les réglages et fiabiliser les accélérateurs linéaires de forte puissance. Cette activité s'articule autour de trois axes principaux.

Par des études de physique du faisceau, nous développons des méthodes de réglage rapide (en moins de quelques secondes) des cavités accélératrices supraconductrices d'un linac, ceci afin de compenser la défaillance potentielle de l'une, ou plusieurs, d'entre elles [7]. Ce concept de compensation de pannes,

initié par l'IN2P3, n'a encore jamais été appliqué à un accélérateur. Nous avons démontré que la mise en œuvre de ce schéma de compensation de pannes peut fortement impacter la stabilité du faisceau et reste très complexe. Ces études font notamment l'objet d'un travail de post-doctorat pour le développement d'un algorithme "intelligent" permettant de calculer et d'anticiper les scénarios de compensation des pannes (voir figure 3). Par ailleurs, une thèse de doctorat portant sur la modélisation de la dynamique du faisceau par des méthodes dites de "machine learning" a été réalisée (soutenue en 2021). L'objectif de ces travaux exploratoires était d'optimiser le contrôle et le réglage (rapidité et précision) des injecteurs (LEBT+RFQ), en particulier celui du linac de MYRRHA. Ce travail a montré qu'il est possible de modéliser un injecteur par un réseau de



neurones dense (voir figure 4) et ceci dans l'objectif de construire un outil "prédicteur" qui permettrait de déterminer en quelques secondes les réglages des éléments de guidage (solénoïdes, etc.) et de collimation en fonction des paramètres faisceau souhaités.

Enfin, 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 permettant de contrôler le champ accélérateur (amplitude et phase) et la fréquence de résonance des cavités accélératrices (système d'accord). Ces modèles sont utilisés pour régler les cavités de SPIRAL2, pour dimensionner le système d'accord des cavités de MYRRHA et pour évaluer les réglages des correcteurs de boucle (PID, feedforward) nécessaires à la mise en œuvre des schémas de compensation de pannes.

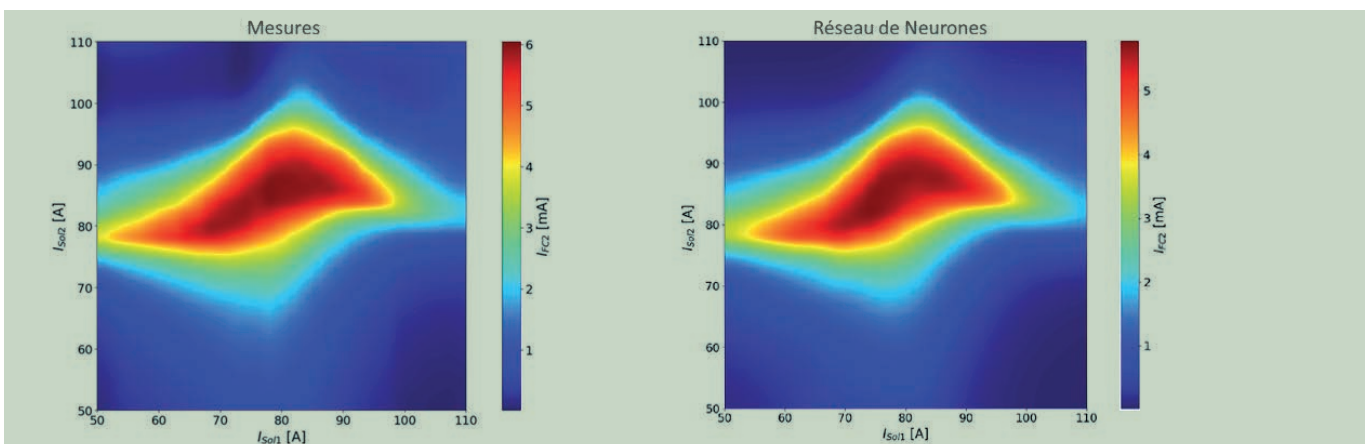


Figure 4. (Crédit M.Debongnie LPSC/CNRS). Courant faisceau (en mA) transmis par la LEBT de MYRRHA en fonction du courant dans les bobines des solénoïdes (la force de focalisation). Gauche : mesure de ce courant transmis ; Droite : modélisation par un réseau de neurones entraîné sur des données expérimentales.

Le projet Multipactor

Le multipactor est un phénomène parasite résonnant, apparaissant dans les structures sous vide soumises à une onde électromagnétique. Dans le domaine des accélérateurs, il peut empêcher l'injection de la puissance radiofréquence vers les cavités accélératrices, voire endommager les coupleurs au point de rompre l'étanchéité au vide de l'accélérateur. Le pôle est investi dans un programme d'étude du multipactor et des dépôts permettant de limiter ce phénomène potentiellement destructeur. Ce programme est mené en collaboration avec l'IJCLab et le SIMaP (qui est rattaché à l'institut de chimie du CNRS). Ces travaux sont notamment soutenus par le CNRS, via l'appel à projet inter-instituts "80Primes" et par l'institut Carnot "Énergies du futur".

Pour le volet expérimental, le pôle a conçu une station d'essai dédiée à l'étude du multipactor. Elle est centrée sur une structure coaxiale résonnante sous vide, dont la fréquence et le champ électrique sont ajustables (80-900 MHz, champ électrique maximum de 0.6 MV/m). Le principe de fonctionnement de cette station innovante ayant été validé, une extension de ses performances est en cours pour permettre une amélioration significative du vide dans l'enceinte afin d'étudier des dépôts de type Non Evaporable Getter (NEG). Les pièces mécaniques sont actuellement en cours de réalisation.

Concernant la modélisation, le pôle a simulé le multipactor sur le banc d'essai avec le logiciel SPARK3D, complétant l'étude réalisée précédemment avec le code MUSICC3D. Ces simulations ont été validées par des expérimentations sur la station d'essai.

Des discussions sont en cours avec l'IJCLab et le CERN afin d'initier de nouvelles collaborations, notamment dans le domaine de la radiofréquence, sur le projet d'Energy Recovery Linac, PERLE, et sur les études du Futur Circular Collider (FCC).

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *Étude et développements de sources d'ions à la résonance cyclotronique électronique*, Habilitation à Diriger des Recherches soutenue par T. Thuillier (2019)
- *Étude par la simulation et l'expérimentation de la production d'ions métalliques Calcium à l'aide d'une source d'ions du type Résonance Cyclotronique Electronique*, thèse soutenue par A. Leduc (2019), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02520530>
- *Effet des déflecteurs électrostatiques et des champs de fuite associés sur la cohérence de spin pour la mesure du moment électrique dipolaire du proton sur anneau de stockage*, thèse soutenue par J. Michaud (2019), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02481832>
- *Compensation des interactions faisceau-faisceau pour l'amélioration des performances du Grand Collisionneur de Hadrons du CERN*, thèse soutenue par A. Poyet (2021), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03508377>
- *Study of machine learning methods for optimization and reliability improvements of high power linacs*, Mathieu Debongnie, Phd Thesis, Université Grenoble Alpes, 2021. English. (NNT : 2021GRALY027). (tel-03497446), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03497446>

Principales publications

1. *Livre Blanc du projet Newgain*, D. Ackermann et al. https://www.ganil-spiral2.eu/wp-content/uploads/2021/06/Whitebook_NEWGAIN-1.pdf
2. *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>
3. *STATUS OF THE 60 GHZ ECR ION SOURCE RESEARCH*, T. Andre et al., ECRIS 2020, Lansing, USA, sept 2020. <https://inspirehep.net/files/7b4694189d204ff0985cf3172f841941>
4. *Method for estimating charge breeder ECR ion source plasma parameters with short pulse 1+ injection of metal ions*, J. Angot, M. Luntinen et al., 2020 Plasma Sources Sci. Technol. 30 035018; <https://arxiv.org/pdf/2103.03546.pdf>
5. *MYRRHA Superconducting linac & Fault Tolerance Concept*, F. Bouly, LINAC2020 virtual conference, Melbourne, Sept. 2020, <http://linac2020.org/presentations/>; <https://hal.archives-ouvertes.fr/in2p3-03062748/>
6. *MYRRHA 80 kW CW RF Coupler Design*, Y. Gómez Martínez et al., IPAC 2019, Melbourne, Australie, May 2019. <https://inspirehep.net/files/4a797a68f9c43857b3714183522a28c3>
7. *Method Development for Cavity Failure Compensation in a Superconducting Linac*, F. Bouly, in Proc. IPAC'21, Campinas, Brazil, May 2021, pp. 647-650. doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-MOPAB191. <https://inspirehep.net/files/efaa23a45b8942fe7146d4064aacd8cc>

ÉQUIPE PLASMAS, MATÉRIAUX, NANOSTRUCTURES

Les activités de recherche de l'équipe 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).

Équipe de recherche : membres permanents

Stéphane Béchu, Alexandre Bès, Laurent Bonny, Dominique Fombaron, Ana Lacoste.

Équipe de recherche : doctorants et post-doctorants

Quentin Gutierrez (doctorant), Alexandre Dieulesaint (doctorant), Maria Mitrou (doctorante), Y Yingaho Xi (doctorante), Halla Handal (post-doctorante), Mathieu Haacké (post-doctorant).

Personnels des services techniques

Johann Menu, Sébastien Roudier, Samuel Roni, Dominique Morotti (Service Études et Réalisations Mécaniques), Damien Tourres, Eric Lagorio (Service Électronique).

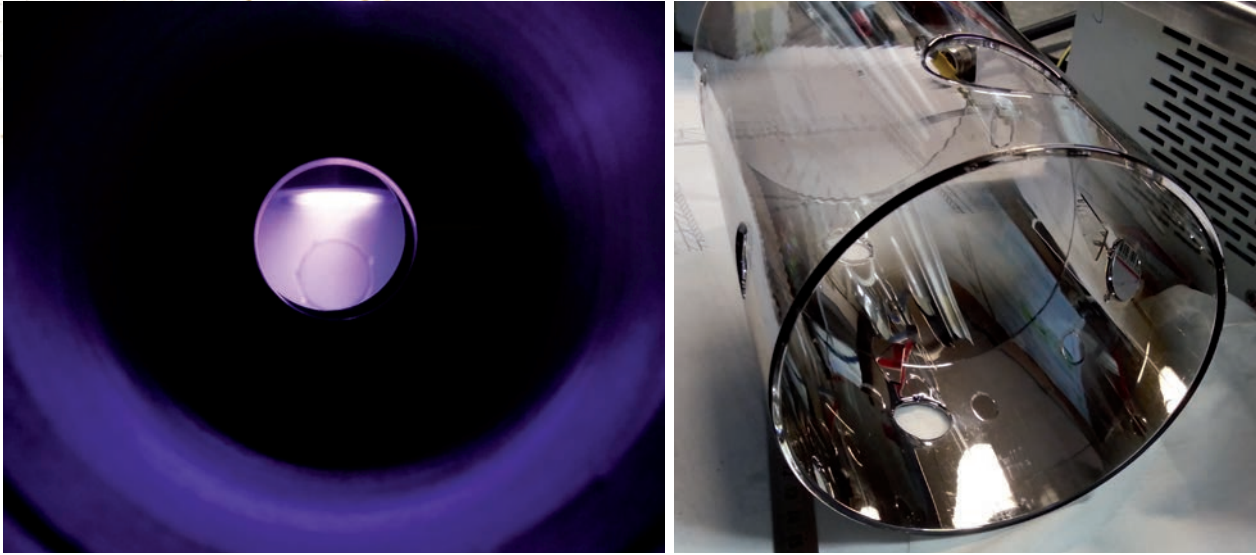


Figure 1. (Crédits Équipe Plasmas, Matériaux & Nanostructures / CNRS).

Plasma d'argon pour le dépôt in-situ par cathode magnétron de films minces de tantale (gauche) et Tube de quartz avec dépôt de Ta utilisé pour l'étude des interactions plasmas H_2/D_2 avec une surface métallique non-oxydée (droite).

Physico-chimie des plasmas H_2/D_2

Cette thématique a été développée pour contribuer au développement d'une source d'ions négatifs H/D-basse pression (0,2 Pa) destinée au chauffage des plasmas tokamak ITER et DEMO. Elle a été menée conjointement avec le CEA-IRFM et soutenue par EUROfusion et la Fédération de recherche Fusion par Confinement Magnétique (FR-FCM) du CNRS.

Ces travaux ont permis de développer des diagnostics plasma inédits et d'obtenir une image exhaustive des espèces neutres et chargées dans ces plasmas H_2/D_2 . Notamment, l'utilisation du rayonnement synchrotron (campagnes 2019 et 2021 sur la ligne DESIRS à SOLEIL) a mis en évidence l'effet majeur d'une surface de tantale sur la production de molécules dans un état de vibration particulièrement favorable à la production d'ions négatifs^[1,2]. Le dispositif réalisé pour cette étude est représenté sur la figure 1. Le même type d'étude sera poursuivi à plus haute pression (< 1 Pa) en mélanges hydrogène/azote en vue de l'amélioration de l'extraction de puissance dans les tokamaks.

Technologies Plasma : sources à pression intermédiaire pour application aux détecteurs à diamant

L'équipe s'est investie dans la conception et la mise en œuvre d'une nouvelle configuration d'applicateur de micro-ondes^[3] permettant l'extension de la zone de dépôt de puissance dans le plasma et l'écoulement efficace de la chaleur qui résulte du fonctionnement à de fortes densités de puissance ($\sim 10 \text{ W/cm}^2$) atteintes pour plus de 1000 Pa en pression et jusqu'à 600 W par coupleur. Ce coupleur a été développé dans le cadre du projet en maturation, ProExtenD (2017-2018), soutenu par la SATT Rhône-Alpes (Linksum), la

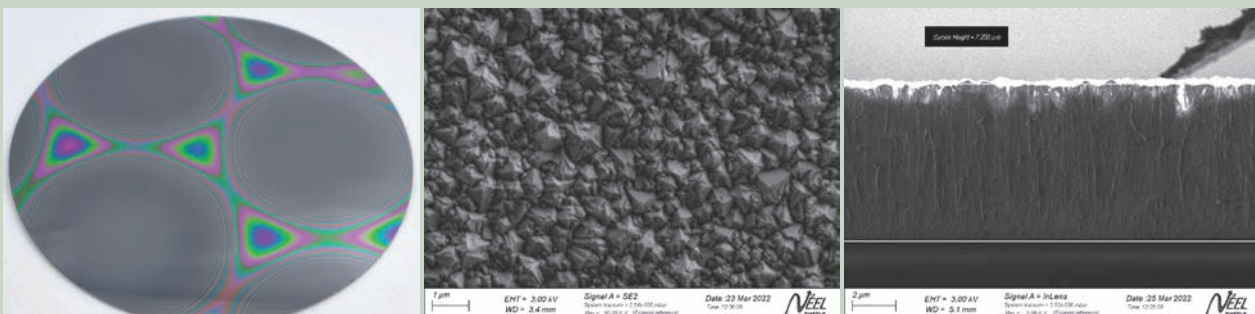


Figure 2. (Crédits Équipe Plasmas, Matériaux & Nanostructures / CNRS).

Dépôt de diamant polycristallin sur plaquette de Si $\phi 100\text{mm}$ (gauche) pour la validation du procédé de dépôt à grande vitesse (1 $\mu\text{m}/\text{heure}$) sur grande surface. Images MEB du matériau : vue de dessus (milieu), vue de côté (droite).

première application visée étant le dépôt de diamant polycristallin uniforme sur de grandes surfaces par l'effet conjugué de la nouvelle configuration et de leur distribution en réseau 2D. Dans le cadre du projet, nous avons validé ce nouveau concept en termes de puissance, durée de fonctionnement et de stabilité du plasma et réalisé des tests de dépôt dans une chambre prototype à 12 coupleurs. Ceux-ci ont permis, d'une part, de valider la reproductibilité du procédé sur Si pour différentes puissances et pressions et, d'autre

part, de démontrer le potentiel de cette technologie pour la synthèse du diamant d'excellente qualité (figure 2 – milieu et droite) avec des vitesses de croissance jusqu'à 1 $\mu\text{m}/\text{heure}$. Les travaux se poursuivent pour optimiser l'uniformité (figure 2 – gauche) et réaliser des épaisseurs de 500 μm permettant d'aller, par exemple, jusqu'à l'application aux détecteurs pour le domaine médical^[4] ou aux revêtements protecteur d'électrodes pour l'électrolyse.

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

En 2019, nous avons démarré une collaboration avec le LHET de l'INES-CEA et proposé une technique innovante^[5] pour le dépôt d'oxydes transparents conducteurs (OTC) utilisées comme électrodes transparentes pour cellules photovoltaïques (PV) à haut rendement, telles que les cellules à hétérojonction (HET) silicium amorphe hydrogéné/silicium

cristallin (a-Si:H/c-Si) ou à pérovskites. La technique proposée, permet le dépôt OTC sans dommage ionique des couches actives des cellules et du film en croissance, ce qui permet de continuer à augmenter les rendements des cellules. Il s'agit d'une technologie hybride qui associe, pour la première fois, la production d'un plasma micro-onde à RCE (résonance cyclotron électronique) et l'évaporation assistée par ce même plasma. Lors de ce travail collaboratif, nous avons validé aussi bien la preuve de concept de cette nouvelle technique que le procédé sur des cellules (150x150 mm^2) avec des électrodes ITO et IWO. Un rendement de 23,9 a été atteint avec ITO, et ce, dans les conditions les plus défavorables, i.e., cellule sortie de la chaîne de fabrication, exposition à l'air, délai entre les 2 procédés de dépôt du substrat (a-Si:H/c-Si) et de l'électrode. Ce résultat est très encourageant si on considère le rendement actuel de 24,3 obtenu par le LHET sur leur chaîne de fabrication. Ce travail se poursuit avec une thèse 2022-2025.

Technologie hybride appliquée à l'éclairage

Dans le cadre du projet ANR2020 – ADELIN (2020-2024) l'équipe développe 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 hybride : plasma de colonne positive DC soutenue par cathode micro-onde. L'efficacité lumineuse attendue repose sur l'entretien du plasma par des micro-ondes et l'utilisation des luminophores optimisés pour

les nouveaux émetteurs utilisés (développement par l'Institut de Chimie de Clermont-Ferrand, partenaire). En effet, l'utilisation d'une cathode micro-onde permet l'emploi d'additifs comme le soufre ou les mélanges $\text{N}_2\text{-O}_2$, autrement exclus dans les lampes fluorescentes actuelles. Les premiers résultats^[7] montrent que, en configuration hybride, une décharge luminescente peut être maintenue à des tensions inférieures à 100 V, les additifs émetteurs n'ont aucun impact chimique sur les surfaces métalliques en contact avec la décharge, la lumière émise par fluorescence présente des caractéristiques photométriques conformes (Indice de Rendu des Couleurs, Température de Couleur). En proposant une rupture sur les tubes à décharges, ce projet a un caractère fortement stratégique face au contexte incontournable de la transition énergétique et, de ce fait, il cible un transfert de technologie.

Procédés plasmas. Matériaux fonctionnels ou intégrés dans les technologies de détecteurs

L'équipe a développé plusieurs procédés de synthèse de matériaux fonctionnels comme, par exemple, le matériau thermochromique VO₂ [8] et le matériau MgH₂ [9] à propriété de stockage d'hydrogène.

VO₂

Lors du projet ANR-PRCI-SMART VO_x, 2015-2019, nous avons validé un procédé de synthèse en une seule étape (sans recuit ex-situ), sur grande

surface (4" : Si, SiO₂, saphir, Al, Kapton) et à température de substrat inférieure à 500 °C. Nous avons ainsi démontré que la sélectivité de la phase unique VO₂ peut être parfaitement contrôlée à basse température (400°C) et par une faible polarisation du substrat. Nous avons également établi, en collaboration avec l'INRS (Varenne-Québec), le lien entre la microstructure du film et ses propriétés électriques et optiques.

MgH₂

Ayant une maîtrise parfaite de la synthèse du MgH₂ [9], l'équipe a participé au projet exploratoire PEPS - HABANA 2019/2020, porté par l'Institut de Chimie et des Matériaux Paris Est. Ce projet visait la réalisation de batteries Na-ion tout solide comme alternative de substitution aux batteries Li-ion et, dans ce contexte, l'équipe a développé un procédé multi-couches Al (Sn)/MgH₂/Cu. Cela a permis de démontrer, pour la première fois, la sodation d'un composé hydrure dans une technologie tout-solide.

Matériaux intégrés dans les technologies de détecteurs à silicium [10] et à diamant [4]

Dans le domaine des détecteurs UCN (Ultra Cold Neutron), une réalisation notable concerne la croissance d'une couche de bore (¹⁰B) avec deux interfaces (Ti, Ni) directement sur un CCD-Silicium (figure 3) pour l'imagerie neutronique de haute résolution (projet collaboratif avec l'équipe UCN du LPSC). Ce procédé multicouche est rendu possible par le système de co-pulvérisation assistée par plasma micro-onde qui permet le montage de cibles de nature différente (Ti, Ni, B) sur un même porte-cibles, et la polarisation individuelle de chaque cible et indépendante de la production du plasma.

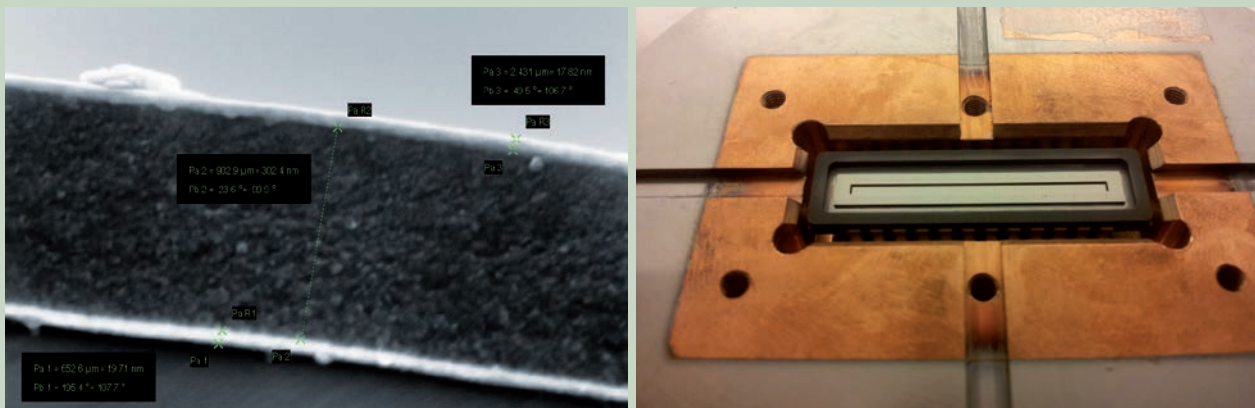


Figure 3. (Crédits Équipe Plasmas, Matériaux & Nanostructures / CNRS.).

Dépôt multicouche de Ni/¹⁰B/Ti (gauche) réalisé sur un détecteur CCD (droite) pour l'imagerie neutronique de haute résolution.

Avec la participation de l'équipe au projet ANR MONODIAM-HE (2013-2017), nous avons été amenés à réaliser les contacts métalliques (double face) sur les détecteurs à diamant (poly- et monocristallin). Nous avons démontré qu'il est possible d'obtenir des électrodes conformes sans l'utilisation de films catalyseurs d'interface, et ce, avec des

métaux moins onéreux (Al, Cu, In) que l'or (Au) habituellement utilisé. Cette méthode entérinée continue d'être utilisée pour les détecteurs développés et étudiés au LPSC^[4] (équipes ATLAS, Physique Nucléaire, Applications Médicales) et au sein du réseau RD42-Diamond Detectors.

POUR EN SAVOIR+

Thèses et HDR

- *Détecteur de neutrons ultra-froids sensible à la position*, 2017 – 2021 Yingaho XI, <http://www.theses.fr/2021GRALY047>

Principales publications

1. *Direct measurements of electronic ground state ro-vibrationally excited D₂ molecules produced on ECR plasma-facing materials by means of VUV-FT absorption spectroscopy*, Béchu S., Lemaire J. L., Gavilan L., Aleiferis S., Shakhatov 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
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
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. *Three-phase metal-insulator transition and structural alternative for a VO₂ film epitaxial grown on Al₂O₃(0001)*, Bailly, S. Grenier, M. M. Villamayor, M. Gaudin, A. Y. Ramos, P. Bouvier, C. Bouchard, L. Magaud, L. Laversenne, B. Mongellaz, E. Bellet-Amalric, A. Bès, A. Lacoste, *JAP*, 126 (2019) 16. <https://doi.org/10.1063/1.5113771>
9. *Thin films as model system for understanding the electrochemical reaction mechanisms in conversion reaction of MgH₂ 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. *Boron-10 conversion layer for ultra-cold neutron detection*, B. Clement, A. Bes, A. Lacoste, R. Combe, V.V. Nesvizhevsky, G. Pignol, D. Rebreyend, Y. Xi, *JINST* 14 P09003, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/P09003>

LABORATOIRE SOUTERRAIN DE MODANE

Créé en 1980, le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) est aujourd'hui une plateforme nationale de l'IN2P3 suite à la fusion avec le LPSC en 2019. Situé sous 1700 m de roches, au milieu du tunnel autoroutier du Fréjus, le LSM offre un environnement caractérisé par l'un des plus faibles taux de radioactivité naturelle au monde grâce à la protection offerte par la montagne vis-à-vis du flux de rayons cosmiques. Ces conditions uniques permettent aux expériences scientifiques qui s'y déroulent de rechercher des phénomènes physiques extrêmement rares – avec une occurrence possible de quelques événements par kilogramme de matière et par siècle.

Ce site souterrain regroupe deux installations : une plateforme d'accueil d'expériences scientifiques, définies dans le cadre de collaborations internationales, qui occupe environ 400 m² au sol ; et une plateforme technologique de spectroscopie gamma de 50 m², 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 au moins les 30 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.).

Par ailleurs, la plateforme nationale LSM possède également un espace muséographique au sein du site de surface, soutenu activement par les collectivités locales et animé par ses personnels. Il y est présenté et expliqué les recherches effectuées en son sein, il accueille chaque année une dizaine de classes des établissements scolaires de la région ce qui contribue fortement à l'éveil scientifique des élèves, ainsi qu'en moyenne 1500 personnes/an (tourisme scientifique).

LA PLATEFORME NATIONALE LSM

Le programme scientifique de la plateforme nationale est défini par l'IN2P3 du CNRS en lien avec ses partenaires. Il se décline dans les domaines de la physique fondamentale et appliquée, au sein de partenariats académiques avec des laboratoires et universités françaises (Besançon, Bordeaux, Caen, Chambéry, Grenoble, Lyon, Paris) ou étrangères (Canada, États-Unis, Royaume-Uni, Russie, Tchéquie) ainsi qu'avec des établissements nationaux (IRSN, CEA). Ces partenariats sont définis dans le cadre d'accords de collaboration internationaux ou nationaux. Il est à noter que ces partenariats sont largement ouverts aux disciplines des géosciences – pour les activités de datation d'échantillons - et de la biologie – pour l'étude du développement de cellules (souches) dans un environnement protégé des rayons cosmiques (Startup PROCELTECH en incubation au sein de la SATT Linksium).

Membres permanents

Ali Dastgheibi-Fard, Valérie Favre, Jean-Louis Margueron, Christian Ranieri, Martin de Raphelis-Soissan, Aurélien Rojas, Christophe Vescovi, Guillaume Warot, Thierry Zampieri.

PARTAGe

Le projet PARTAGe consiste à réorganiser l'implantation des détecteurs Germanium de la plateforme de spectrométrie gamma du LSM afin de pouvoir accueillir, dans un espace réduit, 22 au lieu des 16 détecteurs en activité en 2018. Ce projet, 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 "en ligne" dans deux blindages commun afin d'optimiser

l'espace et la quantité de plomb utilisée. Ces blindages seront situés dans une tente sous flux d'air sans radon afin de réduire au maximum le bruit de fond radioactif. La disposition en ligne des détecteurs permettra aussi dans le futur l'installation d'un système robotisé de changement d'échantillons afin d'augmenter le taux d'utilisation des détecteurs dans le domaine des géosciences qui fonctionnent typiquement avec des temps de comptage de quelques heures.

La livraison des premiers modules de blindage a démarré mi-2019 et a fortement été impactée par la crise sanitaire. En juin 2022, les modules constituant la première ligne de 16 détecteurs "standards" ont tous été livrés et l'installation de la tente anti-radon va pouvoir être effectuée.



Figure 1. (Crédit LPSC-CNRS).

Installation en cours de la première ligne de détecteurs du projets PARTAGe. Les douze premiers détecteurs sont en place et onze blindages plomb circulaires ont été installés. Les blindages sont constitués de 20 cm de plomb faible-activité et d'une couche interne de 5 cm de plomb "archéologique".

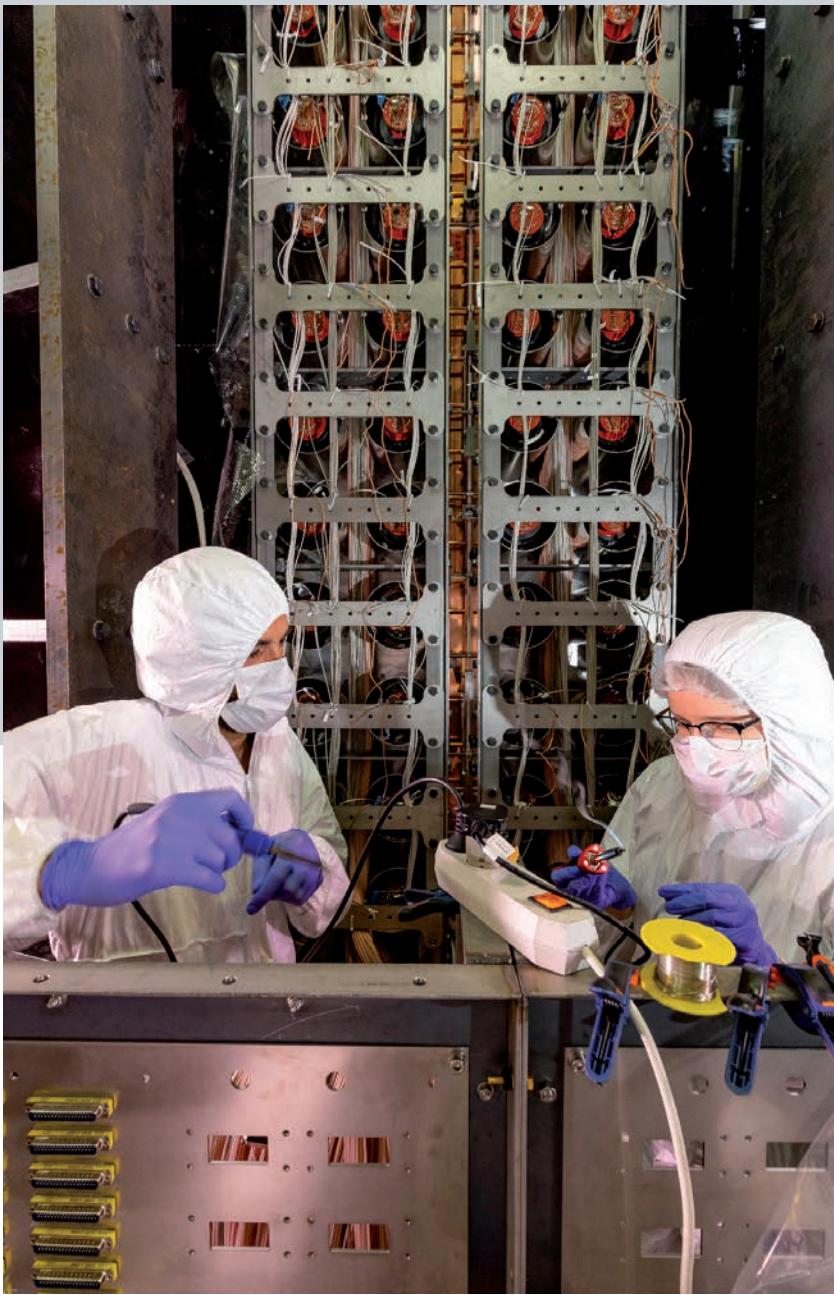


Figure 2. (crédits : P.DUMAS/CNRS).

Câblage en cours du démonstrateur SuperNEMO. Les 1424 modules optiques du calorimètre (scintillateur et photomultiplicateur) et les 2034 fils constituant le trajectomètre sont connectés aux panneaux de connexion afin de les relier aux baies d'électronique de lecture. Le démonstrateur SuperNEMO avec son blindage occupera un volume de $10 \times 6 \times 8 \text{ m}^3$ au LSM.

SuperNEMO

SuperNEMO ^[1] est une expérience de détection de double désintégration β 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, dédié aux expériences $0\nu\beta\beta$ en construisant et en mettant en œuvre un module au LSM. La détection de ces événements extrêmement rares est basée sur un double détecteur de type trajectomètre-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, la plus volumineuse au LSM, a commencé en 2015.

La jonction étanche des deux ensembles détecteurs enserrant les feuilles source a été effectuée au début de l'année 2019 avant de pouvoir finaliser la connexion des milliers de câbles permettant la lecture de ces détecteurs.

La crise sanitaire a fortement impacté l'avancé de la construction du démonstrateur par les membres de cette collaboration internationale. Le détecteur complet a pu être mis en service et prendre des premières données à l'automne 2021 après l'installation de la bobine entourant le détecteur permettant de générer un champ magnétique afin de courber la trajectoire des particules chargées.

Les prochaines étapes en 2022 et 2023 qui vont impliquer fortement l'équipe technique du LSM vont consister à installer la tente anti-radon autour du détecteur et les 120 tonnes du blindage fer. Après une dernière couche de blindage neutronique constituée d'eau et de polyéthylène, le démonstrateur sera prêt à effectuer sa campagne de prise de données au LSM.

CUPID-Mo

L'expérience CUPID-Mo ^[2], installée au Laboratoire Souterrain de Modane dans le cryostat de l'expérience EDELWEISS, a fixé en juin 2020 une nouvelle limite mondiale pour la détection de la signature $0\nu\beta\beta$. CUPID-Mo est une expérience pilote de recherche de désintégration double beta sans neutrino basée sur des bolomètres à scintillation et utilisant des cristaux Li_2MoO_4 . Cette nouvelle technologie vient ainsi de prouver son efficacité tant dans la mesure de l'énergie que dans la réjection de bruit de fond. Ce résultat était vivement attendu par les équipes de physiciens préparant le déploiement à grande échelle de ce type de détecteurs dans un futur proche. Avec ce nouveau

résultat, le LSM conserve sa tradition de record de précision sur la mesure de la période $0\nu\beta\beta$ du noyau ^{100}Mo , obtenu jusqu'alors avec l'expérience NEMO3.

L'expérience a accumulé plus d'une année de données (2,17 kg.an d'exposition) acquises entre mars 2019 et avril 2020. Grâce à un cycle utile efficace, une excellente efficacité d'analyse de 90 % et surtout un bruit de fond nul dans la région d'intérêt, les chercheurs ont fixé une nouvelle limite mondiale pour la détection de la signature $0\nu\beta\beta$: la demi-vie de ^{100}Mo est supérieur à 1.8×10^{24} an. L'équipe technique de la plateforme nationale LSM a fortement contribué à ce succès. Avec son soutien, l'expérience a pu rester en froid sur une période continue de plus de 18 mois démarrée en décembre 2018 (comprenant donc la période de confinement au printemps 2020), pour permettre la prise de données des détecteurs à une température 0,022 degrés au-dessus du zéro absolu.

La technologie CUPID-Mo sera déployée à grande échelle dans l'expérience CUPID, qui prévoit l'installation d'environ 1500 cristaux dans le cryostat actuel de l'expérience CUORE, au laboratoire de Gran Sasso en Italie. CUPID sera alors à la pointe de la recherche sur $0\nu\beta\beta$.



Figure 3. (crédits : P.DUMAS/CNRS).

Fermeture du blindage du cryostat d'EDELWEISS en 2019 lors d'une campagne de calibration. Le cryostat contient 20 bolomètres scintillant Li_2MoO_4 de 210g chacun. Ce cryostat à dilution $^3\text{He}/^4\text{He}$ semi-ouvert conçu par l'Institut Neel de Grenoble et installé au LSM en 2005 a permis de maintenir ces détecteurs à une température de 20mK pendant plus de 18 mois.

DAMIC-M

DAMIC-M est une expérience de détection directe de matière noire^[3] cherchant à détecter des reculs nucléaires ou électroniques dans le silicium de capteurs CDD. Après une phase de R&D au laboratoire souterrain SNOLAB au Canada, il a été décidé d'installer un détecteur approchant la masse du kilogramme au laboratoire souterrain de Modane.

La première étape de l'installation du détecteur DAMIC-M au LSM a eu lieu en 2021 avec construction d'une salle blanche de 20 m². Afin de valider le niveau du bruit de fond atteignable et les techniques bas bruit mises en œuvre, un premier démonstrateur, le Low Background Chamber (LBC), constitué de seulement deux CCD a été monté et installé en fin d'année 2021 au LSM. Ce démonstrateur est toujours en prise de donnée à l'été 2022 et devrait donner lieu à une première série de publication sur les performances du détecteur au LSM en 2023.

La prochaine étape au LSM (2023-2024) va consister en la construction du détecteur final, constitué d'une cinquantaine de CCD. Afin de limiter au maximum la contamination des matériaux par des isotopes cosmogéniques et par le dépôt en surface de descendants du radon, un maximum d'opérations (test, assemblage) seront réalisées dans le laboratoire souterrain sous une atmosphère sans radon.



Figure 4. (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 cm².

POUR EN SAVOIR+

Chiffres clés

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

Taux de muons cosmiques : 4 muons/m²/jour

Concentration de radon : 15 Bq/m³

Surface utile pour la science : 600 m²

Ressources Web

1. <https://supernemo.org/>
2. <https://cupid-mo.mit.edu/>
3. <https://damic.uchicago.edu/>

PLATEFORMES ET INSTALLATIONS TECHNIQUES

Les plateformes de recherche du laboratoire sont des dispositifs à vocation pérenne qui utilisent des moyens spécifiques, des équipements lourds ou mi-lourds, et mobilisent des personnels hautement qualifiés pour leur mise en œuvre. Ces plateformes, contribuent à la réalisation de projets de R&D et au développement des expertises techniques spécifiques qui nous permettrons d'avoir des contributions techniques de pointe dans les projets futurs. Elles peuvent aussi accueillir des acteurs extérieurs (autres laboratoires, partenaires institutionnels ou industriels) et participent à la valorisation des développements techniques réalisés dans le laboratoire.

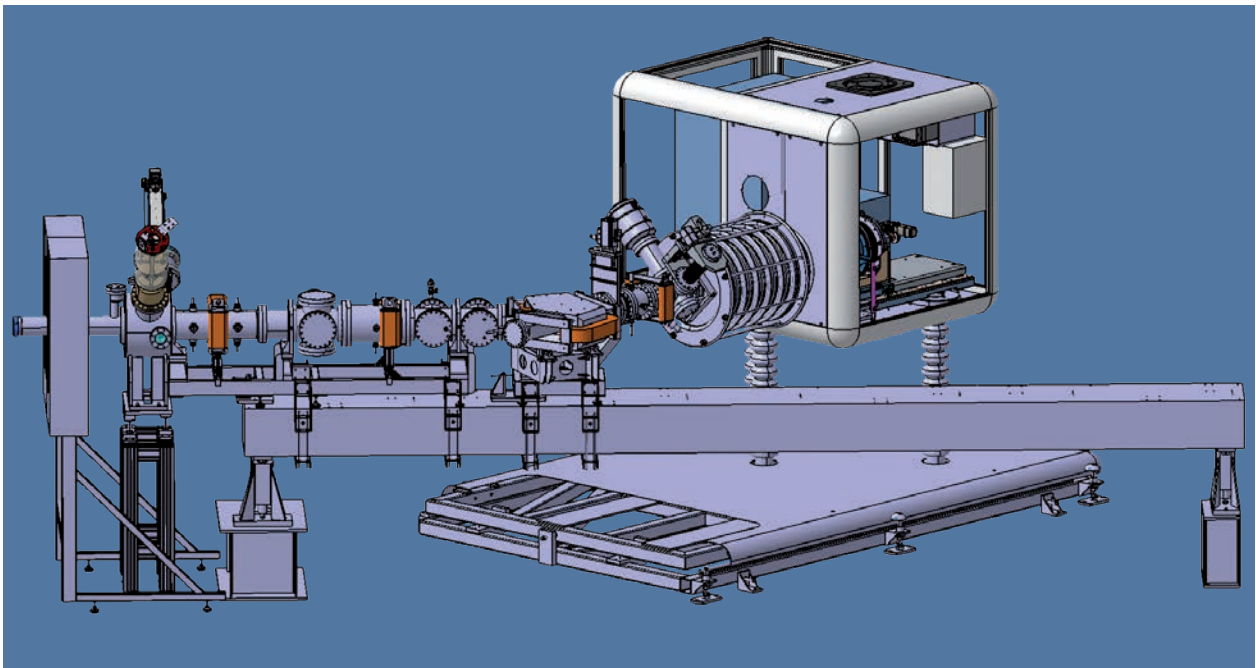
LA PLATEFORME NEUTRONIQUE GENESIS

Personnel impliqué

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

La plateforme GENESIS, labélisée 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 ou 2,5 MeV par interaction de deutons avec une cible de Tritium ou de Deutérium. 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 désirant soumettre leurs détecteurs en cours de développement à un flux intense de neutrons rapides. Ainsi des détecteurs de neutrons en Carbure de Silicium (SiC) développés par l'Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence (IM2NP) ont pu être caractérisés sur la plateforme.



(Crédit: Florian Kiener, LPSC, CNRS).

Au cours des années 2019-2021, 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 diagnostique 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, rejointe au cours des dernières années par de nouvelles collaborations avec des équipes d'autres organismes de recherche tels que le CEA.

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.

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 a un taux d'occupation de plus de 70 % par an.

Ressources Web

<https://lpsc.in2p3.fr/GENESIS>

PLATEFORME FEST

(FLUIDS EXPERIMENTS AND SIMULATIONS IN TEMPERATURE)

Personnel impliqué

Véronique Ghetta, Pablo Rubiolo, Nicolas Capellan (Groupe Physique des Réacteurs), Johann Menu, Julien Giraud, Samuel Roni, Yvan Odievre (Service Études et Réalisations Mécaniques), Murielle Heusch, Julien Marpaud, Olivier Zimmermann (Service Détecteurs et Instrumentation), Éric Lagorio (Service Électronique).

La plateforme FEST est composée de plusieurs installations dédiées aux études expérimentales mettant en jeu des fluides caloporteurs à moyenne ou haute température (sels ou métaux fondus). Les études sont liées à la mise en œuvre de systèmes complexes impliquant dans la plupart des cas des réactions nucléaires dans un milieu fluide ou solide avec des transferts d'énergie et de masse, des changements de phases et des réactions chimiques. Elles s'appuient sur deux volets indissociables :

- des développements numériques seuls capables de prendre en compte la totalité des phénomènes physiques (cf partie groupe physique des Réacteurs)
- des développements expérimentaux conçus pour valider certains aspects des modèles numériques (modèles de turbulences, effets radiatifs, solidification...), mettre en évidence certains processus et développer un savoir-faire lors de la mise en œuvre d'installations avec des fluides modèles non actifs.

Les installations sont entièrement conçues et construites au laboratoire. Leurs designs s'appuient sur des simulations numériques thermiques et hydrauliques préalables effectuées dans le Service Mécanique et le groupe de Physique des Réacteurs. Avant la réalisation de l'installation à l'échelle 1 et en condition réelle avec le fluide dédié, des pré-études sont menées sur des maquettes en eau pour valider le design de certaines pièces, obtenir des mesures du champ de vitesse du liquide par PIV (Particles Image



(Crédit : Julien Giraud, CNRS).

Partie boîte à gants de l'installation SWATH avant la mise en place de l'isolation thermique autour de la section plate. Cette installation fonctionne sans pompe, à partir de deux réservoirs de sels amont et aval qui sont pressurisés tour à tour. Les flèches rouges indiquent le sens et la position de circuit aller (expérience) et retour par l'extérieur de la boîte à gants. Le temps de circulation dans la section est limité par l'écoulement des 60 litres de sels fondu du réservoir amont et le débit choisi.

Velocimetry) ou valider le système de contrôle du pilotage de l'ensemble de l'installation.

Deux boucles en fluorures fondus ont ainsi été mises en œuvre. La première l'installation SWATH (Salt at Walls : Thermal exChanges) en cours de fonctionnement actuellement, permet grâce à la portion de circuit qui traverse une boîte à gants, d'intervenir sur une section démontable du circuit en minimisant les contacts entre le sel, les surfaces de parois internes des

tuyaux avec l'atmosphère environnante. Des sections spécifiques (canal plat, canal ouvert) y sont à l'étude dans le cadre du projet Européen Samosafer.

L'installation précédente FFFER (Forced Fluoride Flow for Experimental Research) qui fonctionnait également avec un fluorure fondu maintenu en circulation forcée avec une pompe est en cours de démantèlement.

La plateforme FEST possède également un groupe de boîtes à gants en atmosphère contrôlée permettant la synthèse des mélanges eutectiques utilisés dans le cas des sels fondus, la mise en forme des matériaux utilisés, et la réalisation d'expériences de plus petite taille que les boucles.

Ces activités mettent en jeu des connaissances et un savoir-faire expérimental utilisables dans plusieurs types d'applications (réacteurs nucléaires, cibles de production de neutrons ou d'isotopes, énergie solaire...).

**POUR EN
SAVOIR+**

Ressources Web

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/plateformes-technologiques/installations-fest>

PLATEFORME DES PROCÉDÉS PLASMA AVANCÉS

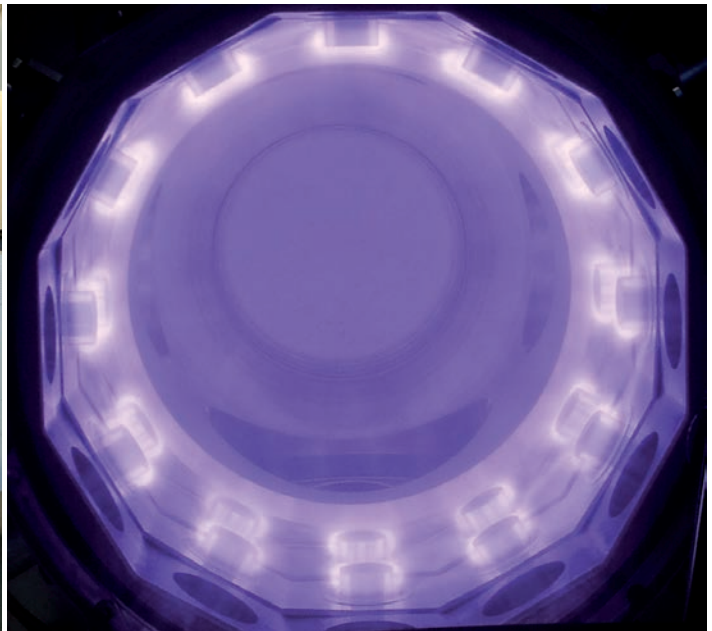
Personnel impliqué

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

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), et 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.

La plateforme IAP3 est recensée par l'Institut Carnot - Énergies du Futur, Filière Eco-énergie. Elle 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 Torr) et en puissance (jusqu'à 5 kW, continu et/ou pulsé),



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

Contrat d'étude de faisabilité (réf. CNRS : 187428), collaboration LPSC - ROLEX, Réacteur plasma LPSC (à gauche), Plasma d'Argon (à droite). Un transfert de technologie sous licence de brevet CNRS (FR2938150) a fait suite au projet de collaboration LPSC-ROLEX réalisé sur l'équipement disponible au LPSC (le réacteur plasma visible à gauche). Celui-ci a consisté en l'étude paramétrique et la mise en corrélation des principaux paramètres de la décharge obtenue pour différentes conditions opératoires (composition et pression du gaz (plasma d'Argon, à droite), puissance, polarisation et température du substrat) avec les propriétés fonctionnelles des échantillons traités. La modification micro-structurale des surfaces traitées a été analysée directement sur les plateformes grenobloises, au moyen de MEB, RDX et coupes métallographiques, et par ROLEX, à travers une combinaison de techniques spécifiques au domaine de l'horlogerie.

et des systèmes de contrôle de température lors des procédés (-100 à 800 °C). Plus précisément, la plateforme dispose de :

- deux réacteurs pour des dépôts par pulvérisation réactive assistée par plasma micro-onde (PEPVD) pour la synthèse de matériaux en films minces,
- un réacteur de dépôt par CVD assistée par plasma (PECVD) pour la synthèse de matériaux,
- un réacteur 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) permettent le contrôle et la qualification des procédés mis en œuvre sur ces équipements.

L'accès à ces installations est réglementé au travers d'une charte d'utilisation co-signée par le CNRS et l'UGA. Les études sont effectuées sous forme de prestations académiques ou industrielles. En plus de son utilisation pour la Formation Continue et des ateliers organisés dans le cadre du Réseau CNRS des plasmas froids, plusieurs actions ont été menées sur les équipements de la plateforme pendant la période 2019-2021. On peut mentionner :

- la réalisation de films minces Al/MgH₂ sur substrat de Cu pour les batteries à Li (Institut de Chimie et des Matériaux Paris Est (ICMPE)),
- la gravure isotrope à grande vitesse de diamant monocristallin pour détecteurs de rayonnement haute énergie (ESRF – ISSD Division Détecteurs),

- le dépôt en multicouches à base de bore pour détecteurs de neutrons (LPSC (GRANIT) et ESRF),
- le dépôt d'alliages en simple ou en multicouches sur plots thermoélectriques (TE) (Valeo, 92000 La Verrière),
- des tests d'applicateurs d'onde coaxiaux à différentes fréquences pour des applications aux dépôts à très basse pression (IERIS, TED [cf. projet FUI-GMP DLC2]),
- la croissance de diamant microcristallin dans le cadre du projet de maturation Linksium "ProExtenD" : développement d'une technologie dédiée aux procédés par plasma qui requièrent des grandes vitesses et bonne uniformité sur grande surface à des pressions supérieures au Torr,
- le dépôt de VO₂, matériau thermochromique (transition Métal – Isolant), sur différents substrats : SiO₂ / Saphir / Aluminium / Kapton, avec contrôle de l'épaisseur, du degré d'oxydation et de la cristallinité (collaboration INRS Varennes Canada) et le dépôt d'Oxyde Transparent Conducteur sur cellule photovoltaïque avec le développement d'une technologie hybride innovante : évaporation assistée plasma (brevet CNRS-CEA FR3118280, collaboration CEA Liten/INES).

Ces études ont ouvert de nouvelles perspectives en termes de projets et d'applications, et ont conduit à des projets applicatifs et de valorisation.

POUR EN SAVOIR+

Chiffres clés

Sur la période 2019 – 2021, accueil de 4 doctorants, 2 post-doctorants et 6 stagiaires (M2 / M1 et école d'ingénieur).
Organisation de 2 formations continues.

Ressources Web

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/groupe-de-physique/le-crpmn/lang-fr-anciennes-pages-lang-lang-en-old-pages-lang-reacteurs-plasma/plate-forme-iap3/vocation-de-la-plate-forme-iap3>

LABORATOIRE DE MESURES DE BASSE ACTIVITÉ

Personnel impliqué

Murielle Heusch, Olivier Méplan et Mourad Ramdhane.

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 γ . 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) puis de 20 cm de plomb ultra pur. Ils sont placés à l'intérieur d'un cube formé par des véto (scintillateurs) interdisant 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 de trois types. Tout d'abord, certains proviennent de l'industrie nucléaire et tout particulièrement la métallurgie du zirconium, des produits miniers au métal purifié, en passant par toutes les étapes de la chimie d'élaboration (zircone, tétrachlorure de zirconium, zircone déhafnié). 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



(Crédit : Olivier Méplan, CNRS).

Photo des châteaux de plomb entourant les détecteurs germanium. Les véto cosmiques interdisant le comptage lors de la détection de muons cosmiques sont partiellement visibles. À gauche apparaissent les scintillateurs plastique servant de "porte", tandis qu'à droite, on voit les liquides pour les autres faces (en vert).

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...).

POUR EN SAVOIR+

Ressources Web

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/plateformes-technologiques/lang-fr-lba-lang-lang-en-lba-lang>

<http://reseau-becquerel.in2p3.fr/>

SALLE DE COSMOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Personnel impliqué

Andrea Catalano, Juan Macías-Pérez, Julien Bounmy, Christophe Houarau, Olivier Bourrion, Damien Tourres, Alessandro Monfardini (Institut Néel), Martino Calvo (Institut Néel).

Les laboratoires LPSC, Institut Néel, IPAG et IRAM sont moteurs dans le développement de la nouvelle génération de détecteurs cryogéniques *Kinetic Inductance Detectors* (KID), leur validation photométrique, leur système électronique de lecture, l'instrumentation annexe et l'étalonnage scientifique. Ces 4 laboratoires ont formalisé un Groupe d'Intérêt Scientifique (GIS). Ce GIS vise à améliorer la visibilité des activités de la collaboration.

Le groupe COSMO-ML au LPSC ensemble avec les services électronique, SDI et mécanique joue un

rôle clé pour ce qui concerne le développement de l'électronique de lecture des détecteurs, le design et la fabrication des optiques de reprise, les mesures de caractérisation et le développement des logiciels d'acquisition. En 2021 nous avons renforcé les activités de KID-GIS en équipant un nouveau laboratoire millimétrique au LPSC qui a été installé dans le hall projet du laboratoire et fonctionne en parallèle de celui déjà en fonctionnement à l'Institut Néel.



(Crédit : A. Catalano, CNRS).

Photo de la salle de cosmologie expérimentale : on peut distinguer un cryostat à dilution contenant les matrices de détecteurs KID, un interféromètre de type Martin-Puplett utilisé pour la caractérisation optique des détecteurs et une série de sous-systèmes (compresseur, banc de pompage, détecteurs de fuite) qui servent à faire fonctionner l'ensemble.

Les activités de la salle expérimentale tournent essentiellement autour de 3 axes :

- développement d'une nouvelle génération de cartes électroniques de lecture,
- mesures de caractérisation des matrices des KID pour l'espace,
- R&D antireflet optique : mesures à froid sur les échantillons d'Anti-Reflet produits par l'atelier du LPSC.

Une telle installation a aussi l'ambition de pouvoir répondre aux besoins d'autres activités qui sont menées au sein de notre laboratoire et qui demandent directement un environnement cryogénique.

Par exemple :

- sensibilisation des étudiants à l'instrumentation millimétrique à travers des TP,
- développements des amplificateur froid à bas bruit,
- mesures à froid pour Ricochet.

Dans cette installation nous pouvons mettre en œuvre des mesures avec une chaîne complète (détecteurs froid, électronique froide et chaude, optique, software d'acquisition) permettant de produire un signal qui puisse être traité pour obtenir une information scientifique.

POUR EN SAVOIR+

Chiffres clés

Température opérationnelle du cryostat : 100mK

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

Ressources Web

https://ipag.osug.fr/~ponthien/GIS_Website/contacts.html

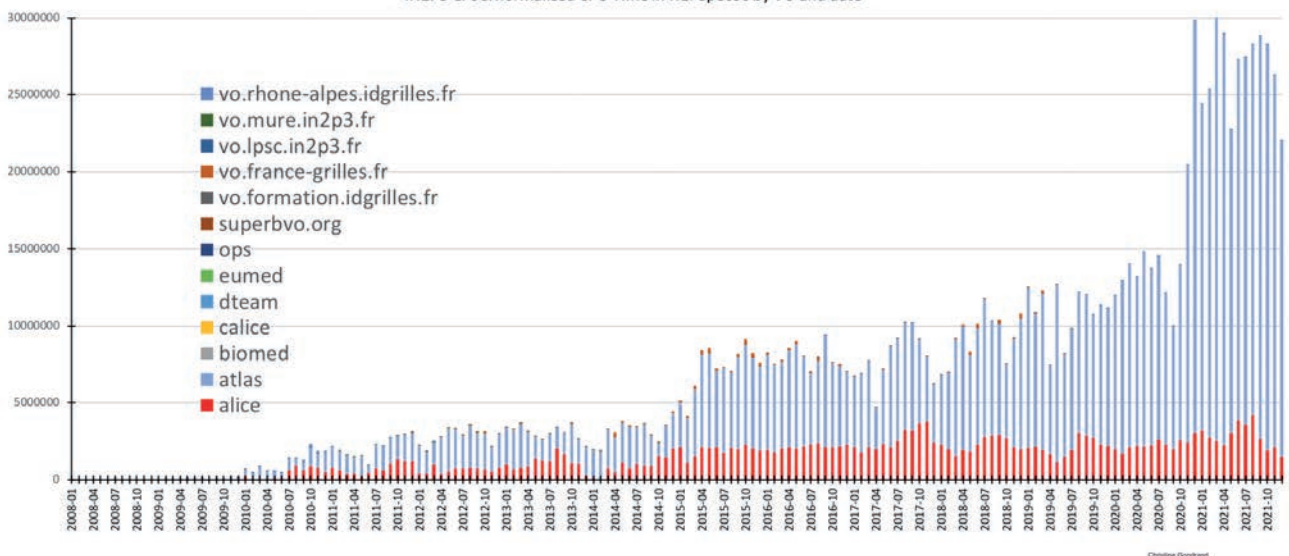
GRILLE DE CALCUL (TIER-2)

Personnel impliqué

- Sabine Crépe-Renaudin puis Pierre-Antoine Delsart (Responsable Scientifique du Tier-2, équipe ATLAS),
- Rachid Guernane puis Gustavo Conesa-Balbastre (équipe ALICE), Catherine Biscarat (départ Août 2019),
- Christine Gondrand (responsable Technique du Tier2, Service Informatique), Frédéric Melot (Service Informatique).

Le fonctionnement technique du site repose toujours sur une seule personne pour environ 0,5 FTE. Le service informatique du laboratoire apporte également ponctuellement son support pour le réseau et les actions générales de maintenance. Il faut souligner que ce support réduit a permis malgré tout d'assurer le très bon fonctionnement du site et la mise en place de toutes les mises à jour des services programmés qui étaient particulièrement conséquentes. Un autre membre de l'équipe a terminé son mandat à la direction technique de LCG-France en août 2019 et a quitté le laboratoire. Enfin un physicien pour chacune des expériences LHC assure le support scientifique du site. L'un d'eux assure la responsabilité scientifique du site (0,3 FTE) et est très impliqué dans l'équipe de calcul distribué de l'expérience ATLAS.

Noeud de Grille Tier2 du LPSC (2008-2021):
IN2P3-LPSC: normalized CPU Time in HEPspec06 by VO and date



(Crédit: C. Gondrand, LPSC, CNRS).

Évolution mois par mois du temps de calcul normalisé utilisé par les différentes VO supportées par le LPSC depuis la mise en production du site jusqu'à décembre 2021.

Le noeud de grille du LPSC est un site certifié de l'infrastructure de grille européenne European Grid Infrastructure (EGI) et est principalement utilisé dans le cadre de la grille mondiale pour le traitement des données issues des expériences auprès du Large Hadron Collider (LHC), coordonnée par Worldwide LHC Computing Grid (WLCG). Mis en place en 2008, le site est depuis 2011 un site de niveau Tier-2 de WLCG. En 2021, il possède une capacité de 25 000 HEP-SPEC06 (soit la capacité de tourner plus de 2000 processus en parallèle) et une capacité de stockage de 1,6 Po net.

Discussion sur le futur du site de grille en 2019

La situation extrêmement tendue (passée, actuelle et future) des ressources humaines au service informatique du laboratoire associée à l'incertitude sur les futurs financements locaux a conduit à mener une réflexion sur le pérennité du site de grille. Du fait de ces incertitudes et malgré les besoins futurs très importants des expériences LHC, l'implication de l'équipe et le très bon fonctionnement du site, la direction du laboratoire n'a pas souhaité continuer à supporter cette activité.

Des discussions ont donc suivi pour trouver la meilleure manière d'arrêter progressivement les activités du site en gardant une configuration efficace et utile pour les expériences. Il a été ainsi décidé, d'arrêter les investissements en matériel à partir de 2020. Étant donné qu'une grande partie du stockage d'ALICE devait être remplacé en 2020, le stockage restant n'était pas très important. Le stockage d'ALICE a été retiré dès 2020 et les serveurs de stockage restant toujours sous garanties ont été transférés à ATLAS ce qui permettra de garder un stockage raisonnable pour cette expérience pour encore quelques années. En suivant la décroissance des ressources ainsi restantes, il apparaît que le site pourra tourner avec une taille raisonnable jusqu'en 2023 environ.

Activités de développement

Les demandes en calcul et stockage des futurs expériences de nos domaines sont très importantes et

différentes initiatives de recherche et développement ont vu le jour. Une des problématiques les plus compliquées est celle du stockage et de l'accès aux données et sont étudiées sous le couvert d'organisations telle que DOMA (DOMA-Fr en France) ou ESCAPE.

Deux personnes du site sont impliquées dans ces développements et ont participé au déploiement d'un banc de test basé sur une fédération DPM regroupant 4 sites (CPPM, LAPP, LPC et LPSC), intégré à l'expérience ATLAS. L'idée est d'évaluer la faisabilité d'une telle fédération, de montrer les fonctionnalités déjà présentes et celles qu'il serait utile de développer. D'autre part il s'agit d'évaluer les avantages et inconvénients de la gestion d'un tel site par l'équipe technique locale et par les expériences. Enfin, les impacts sur les efficacité du traitement des données selon le positionnement des données et aussi sur le réseau devront être mesurés. Ce travail a fait l'objet d'une publication à CHEP 2019.

POUR EN SAVOIR+

Chiffres clés

La contribution du site du LPSC relative à celle de l'ensemble des Tier-2 de LCG France pour la VO ATLAS est de 10 % pour la période 2019-2021.

Ressources Web

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/services/informatique/in2p3-lpsc-noeud-de-grille>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03047541>

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 généralement 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 assure une formation générale en physique avancée et la seconde est une spécialisation.

En première année, les enseignants du LPSC sont particulièrement impliqués dans les UE en lien avec les thématiques de recherche de laboratoire.

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 29^e section : physique des particules, théorie quantique des champs, cosmologie, astroparticules, tant sur le plan théorique qu'expérimental.

3) Théories de Yang-Mills
 3.1) Action du groupe de jauge sur le multipl. ψ .

Espace vectoriel de dimension n construit sur \mathbb{R} ou \mathbb{C}
 $\dim V = n$ degré de la représentation V
 $\hookrightarrow V$ est une représentation de G

$[E_a, E_b] = C_{ab}^c E_c$
 $g = \exp(\theta^a E_a)$

$[A_a, A_b] = C_{ab}^c A_c$ photocopie des relations entre les générateurs E_a

$V \xrightarrow{\rho_g} V \xrightarrow{\rho_{g'}} V$
 $\vec{x} \mapsto \vec{y} \mapsto \vec{z} = (\rho_{g'} \circ \rho_g) \vec{x} \quad [\vec{z}] = R' \times R \times [\vec{x}]$

ρ est une représentation linéaire de G si V, g, g'
 $\rho_{g'} \circ \rho_g = \rho_{g'g}$ où \cdot est la loi de composition dans le groupe

Dans le groupe $\vec{x} E_a \vec{y} E_b \vec{z} E_c$
 $g' \cdot g = \exp(Y) \cdot \exp(X) = e^X e^Y = e^{\vec{x} E_a + \vec{y} E_b} = e^{\vec{z} E_c}$
 Dans l'espace V
 $R' \times R = e^{\vec{x} A_a} \times e^{\vec{y} A_b} \equiv e^{\vec{z} A_c}$

$\vec{z} = \vec{x} + \vec{y} + K_{bc}^{ac} \vec{x} \vec{y} + O(\beta) = \vec{x} + \vec{y} + K_{bc}^{ac} \vec{x} \vec{y} + \dots$
 On obtient le même \vec{z} puisque les relations de commutation entre les A_a sont analogues à celles des E_a .

$M = e^{-i\theta^a T_a / \hbar} = \mathbb{1} - \frac{i}{\hbar} \theta^a T_a$
 L'élément neutre
 $M = \mathbb{1} + \frac{\theta^a E_a}{\hbar} = \mathbb{1} + \text{algèbre}$

ρ_g : automorphisme de V - Application linéaire bijective de V dans V
 $\rho_g(d\vec{u} + \beta \vec{v}) = d\rho_g(\vec{u}) + \beta \rho_g(\vec{v})$
 $[y] = R[x] = \exp(\theta^a A_a) \cdot [x]$
 Matrice $n \times n$ agit sur V

$e^M = 1 + M + \frac{M^2}{2} + \dots + \frac{M^n}{n!} + \dots$

Figure 1. (Crédits : P. Salati, LAPTh). - Un extrait du cours de Théorie Quantique des Champs en M2 PSC.

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 Radio-protection de l'Homme et de l'Environnement**" 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 DQPRM. Elle bénéficie de la plateforme de travaux pratiques de physique subatomique du laboratoire, qui a développé un atelier original de tomographie par émission de positons.

Le laboratoire est aussi présent dans les spécialités de M2 "**Énergétique 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 qui 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 Énergétique et Nucléaire**” (GEN) qui forme 45 à 50 ingénieurs par an, spécialisés majoritairement dans la physique du cœur du réacteur. Cette formation est la première de France en termes de formation initiale d'ingénieurs nucléaires. En complément de

cette filière, l'école Phelma gère le master 2 “**Énergétique nucléaire**” qui offre également un parcours de formation aux énergies renouvelables et compte entre 10 et 20 étudiants. Les enseignants du LPSC sont également impliqués dans le master international en métallurgie nucléaire, ouvert en collaboration avec l'université de Mac Master (Canada), EDF et le CEA, l'accueil d'étudiants chinois de l'université NCEPU (Pékin) au niveau licence (5 à 20 par an depuis 2008) et dans la filière “**Ingénierie pour l'Énergie Nucléaire**” de l'école ENSE3 qui forme chaque année 25 élèves-ingénieurs.

AUTRES FORMATIONS

L'école ESIPAP

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 plasma 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, des formations spécifiques "à la carte" pour des laboratoires et des entreprises.

Leçon expérimentale sur l'antimatière (LExA)

Depuis 2019, des enseignants du LPSC ont développé une leçon sur l'antimatière à destination des lycéens. En lien avec le rectorat et à la demande des enseignants de lycées intéressés, un intervenant du LPSC vient présenter la leçon à une ou plusieurs classes sur un créneau type de 50 mn. Cette intervention comporte une démonstration expérimentale (voir figure 2) et un exposé scientifique.

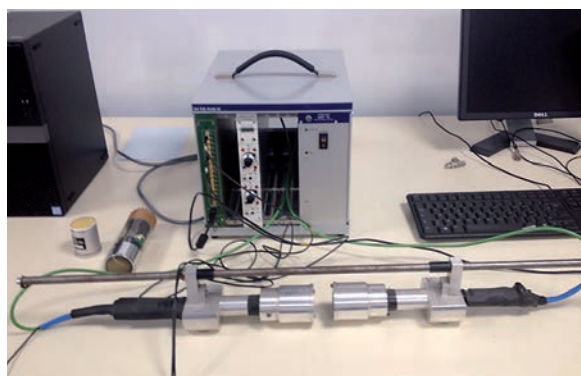


Figure 2 (Crédits : Crédits : Johann Collot, LPSC).

Dispositif expérimental de la leçon LEXA, composé d'un couple de photomultiplicateurs pour la détection de photons gamma en coïncidence.



Figure 3. (Crédits : Benoit Clément, LPSC). - Open space de la plateforme de travaux pratiques.

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 le pôle grenoblois, elle a donc un rôle central dans l'ensemble des formations décrites précédemment (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 3) qui accueille une quinzaine de postes de travail couvrant de multiples types de rayonnements (alpha, beta, 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).



Figure 4. (Crédits : Benoit Clément, LPSC).

Boîtes permettant la manipulation sûre de sources radioactives réalisées par l'atelier en impression 3D.

La plateforme de TP peut s'appuyer sur les moyens techniques du LPSC pour le développement et la maintenance des installations, tels des développements d'électronique d'acquisition ou la réalisation de pièces mécaniques (figure 4).

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/>

COMMUNICATION ET DIFFUSION DES CONNAISSANCES

Ces activités entendent la contribution à la mise en œuvre ou l'organisation d'actions variées (événements, création et mise à jour de contenus et de matériels, etc.), engagées à l'initiative des personnels du laboratoire, ou sous l'impulsion d'actions collaboratives et/ou institutionnelles, et s'adressant aux personnels du laboratoire, à la communauté institutionnelle, scientifique, au grand public et au monde éducatif.

Les activités de communication du laboratoire ont été fortement perturbées par la pandémie de COVID-19, et nombre d'évènements ont malheureusement été annulés, reportés, ou maintenus en version "tout distanciel", ou bien encore "hybride" lorsque possible.

COMMUNICATION

Diffuser la connaissance vers la société, relayer et soutenir la communication institutionnelle, améliorer le fonctionnement du laboratoire sont les objectifs des activités de communication, co-pilotées par le service communication & documentation du laboratoire et un Comité Technique Communication interne, formé de membres de la direction ainsi que de personnels scientifiques et techniques représentant les différentes thématiques de recherche et services du LPSC.

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 2019-2021.

Parallèlement, de nombreux séminaires scientifiques ont lieu chaque année au LPSC. La plupart sont donnés par des personnes extérieures au laboratoire, mais sont également inclus, dans la liste de ces événements, les séminaires donnés par les doctorants 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.

Oufs d'Astro

Le laboratoire est un partenaire habituel du planétarium de Vaulx-en-Verin dans le cadre de son festival Oufs d'Astro – biennale du ciel et de l'espace. Pour la sixième édition, en avril 2019, ayant pour thème "L'univers des extrêmes" deux "suppôts de l'Univers en expansion" exerçant habituellement leurs talents au LPSC se sont transportés au planétarium devenu pour l'occasion l'un des derniers bastions de la résistance intellectuelle face au pouvoir en place appelé "les aplatistes".

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 auprès des lycées de l’académie de Grenoble. En 2021, des personnels féminins du laboratoire ont piloté et pris part à l’édition grenobloise de l’exposition nationale “La Science taille XXElles”.

Réseaux sociaux

En plus de ses sites web et intranet, le LPSC alimente des comptes Twitter et LinkedIn, animés par le service communication du laboratoire. Cette présence sur les réseaux sociaux est l’occasion de relayer des informations institutionnelles, et de mettre en valeur les activités et compétences scientifiques et techniques du laboratoire. Une chaîne YouTube permet parallèlement la publication de contenus vidéos.

Visites de classes de lycées et d’étudiants au laboratoire

Les sites grenoblois et modanais du LPSC accueillent très régulièrement des classes de lycéens et d’étudiants d’établissements français et étrangers. 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

Chaque année depuis 2010 (hormis 2019-2020) le LPSC accueille des classes de lycées durant une journée, dans le cadre du programme des Masterclasses internationales organisées 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 vidéo conférence 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. En 2019 et 2020, le LPSC a assuré l’accueil de près de 65 élèves dans ce cadre. En 2020 et 2021, l’organisation de sessions de stage d’observation a été compromise par la pandémie de COVID 19.

Événements internes

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 Philippe Laudet (CNES) en 2020 “SEIS : un sismomètre français sur Mars”.

FAITS MARQUANTS 2019-2021

Projet vidéo : Enigmass, ou l'énigme de la masse

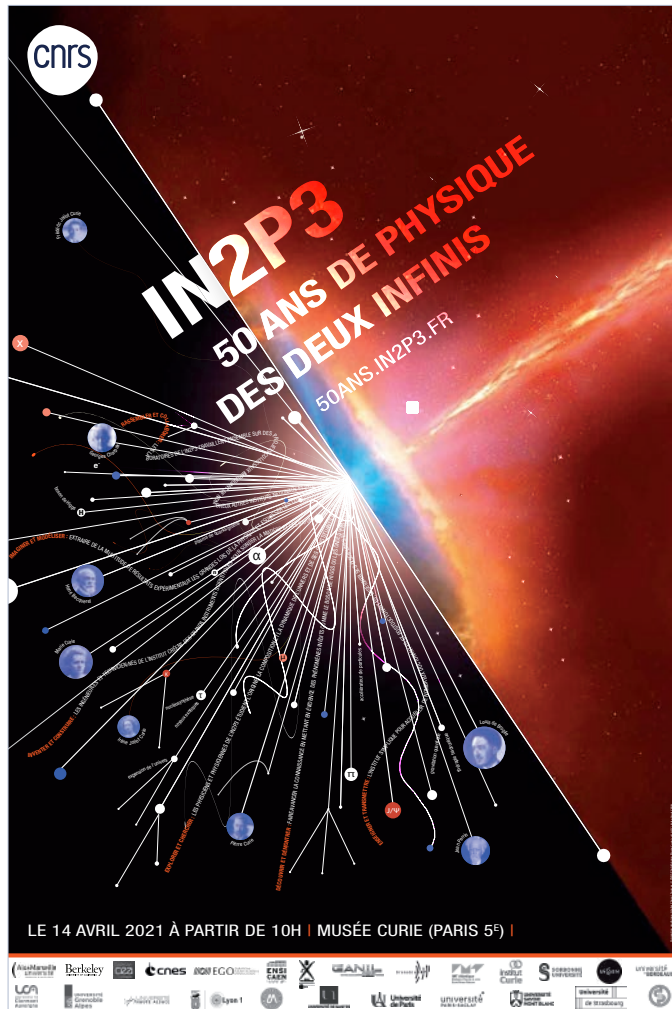
Fin 2020, le LabEx Enigmass, projet fédérateur entre plusieurs laboratoires de recherche scientifique alpins (LPSC, LAPP & LAPTH) et financé depuis 2012 par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir, a souhaité engager une action de communication efficace et originale afin de promouvoir ses activités et son fonctionnement. Les services communication

des laboratoires, et le correspondant communication du LabEx, ont alors entamé une longue collaboration afin de faire naître un projet vidéo inédit, alliant science et humour. Après élaboration d'un cahier des charges, définissant les objectifs de l'action et le public ciblé, le LabEx a contacté l'humoriste lyonnais Karim Duval, connu pour son appétence pour dépeindre les sujets sérieux de manière décontractée. Après plusieurs mois d'interactions, afin de converger vers un script et de travailler sur les interventions des scientifiques du LabEx sélectionnés pour le tournage, la vidéo "Enigmass, ou l'énigme de la masse" a été publiée sur LinkedIn dans un premier temps, puis sur YouTube, et a rencontré un grand succès (près de 250 000 vues tous comptes confondus), et généré des commentaires très positifs, tant du grand public que de la communauté scientifique.



(Crédits : Youtube / AMIETS PROD / LabEx Enigmass). - Capture d'écran de la vidéo "Enigmass, ou l'énigme de la masse".

L'IN2P3 a fêté ses 50 ans en 2021



Le 14 avril 2021, l'IN2P3 a fêté ses 50 ans et a profité de cet anniversaire pour mettre en avant l'institut, ses personnels, ses réalisations et ses disciplines. Ainsi fin 2020, les laboratoires ont été, en premier lieu, invités à participer à la création de contenus de supports de communication, puis durant toute l'année 2021, à relayer les informations de l'IN2P3 en lien avec cette célébration, et enfin à organiser une journée anniversaire en laboratoire. L'implication du LPSC a débuté par la réalisation d'un historique illustré concernant les activités de ses 2 sites durant les 50 dernières années. Les frises chronologiques ainsi produites ont été intégrées au site web dédié créé par l'IN2P3 pour l'occasion, ont été imprimées sur kakemono, et ont complété une exposition panneaux spécialement produite par l'IN2P3. Une journée anniversaire, organisée à Grenoble et se voulant conviviale et commémorative, s'est déroulée le 22 septembre 2021, en présence de la direction IN2P3 et des personnels du LPSC. Les allocutions du directeur de l'institut et du directeur du laboratoire, et des interventions de personnels du LPSC représentatifs des différentes thématiques de recherche de l'IN2P3 se sont succédé avant la tenue d'un cocktail déjeunatoire qui a clôturé la matinée de festivités.

(Crédits : IN2P3 CNRS).

Affiche officielle de l'évènement IN2P3, "50 ans de physique des deux infinis".



PARTICULE ET RÉVÉLATIONS

(Crédits : IN2P3 CNRS). - Logo de l'escape game "Particule et Révélations" du 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'événements à destination du grand public, et de publics scolaires. 65 élèves de lycée ont joué l'escape game du LPSC en 2021. Les retours des joueurs, des enseignants accompagnateurs, et des maîtres du jeu sont très positifs.

POUR EN SAVOIR+

Ressources Web

- Site web LPSC : <https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/>
- Page web LPSC "Congrès, workshop", journées d'études organisées par le LPSC : <https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/services/communication/congres-seminaires-scientifiques-mcom-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/index.php/fr/services/communication/-actions-grand-public-scolaires-com-fr/master-classes-mcomfr>
- Compte Twitter LPSC : <https://twitter.com/LPSCGrenoble>
- Vidéo "Enigmass, ou l'énigme de la masse" (compte YouTube ENIGMASS) : 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/index.php/fr/services/communication/evenements-actions-grand-public-scolaires-com-fr/lecon-antimatiere-2>

SOUTIEN AUX ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Les services techniques en soutien à la recherche réunissent un certain nombre de métiers. Ce sont : le Service Électronique, le Service Informatique, le Service Études et Réalisations Mécaniques, le Service Détecteurs & Instrumentation, le service accélérateurs et sources d'ions. S'ajoute à cette liste depuis Janvier 2019 le Service d'Ultra Basse Radioactivité, qui assure les activités techniques de la plateforme nationale en milieu souterrain.

Les services techniques permettent l'élaboration, la R&D, la construction, la mise en œuvre et la maintenance de détecteurs ou de systèmes complexes au cœur des projets scientifiques du laboratoire. Au sein de chaque service, les personnels peuvent se répartir sur plusieurs projets avec un degré d'investissement défini par les priorités scientifiques du laboratoire, en lien avec le chef de service qui fixe le plan de charge du service.

Les services techniques constituent un atout majeur pour le laboratoire. Ils apportent notamment des expertises dans des domaines de pointe, lesquels ont débouché dans des prises de responsabilité extrêmement importantes et visibles dans de nombreux projets nationaux et internationaux, et trouvent leur application dans les futurs projets de l'institut

Par ailleurs, un certain nombre de services sont indispensables au montage et à l'accompagnement des projets, au suivi des finances et des personnels au laboratoire ; ce sont : le Service Administratif & Financier, le Service Communication & Documentation, le Service Patrimoine et Infrastructures et le Service Sécurité et Radioprotection.

Le Service Administratif et Financier joue un rôle essentiel dans la gestion des liens avec l'institut, la Délégation du CNRS, ainsi qu'envers les tutelles universitaires et pour le soutien au personnel dans la gestion de leur carrière au quotidien, leur accueil au laboratoire, que dans le montage et le suivi administratif des appel à projets.

Le laboratoire bénéficie également d'actions ciblées et récurrentes du service de communication et documentation, qui assure le suivi des productions scientifiques des agents du laboratoire, contribuant ainsi à la visibilité du laboratoire en direction de nos tutelles et des instances d'évaluation comme l'HCERES. Ce service conduit également des actions de communication auprès du grand public et apporte un soutien à l'organisation des conférences et ateliers au laboratoire

Le laboratoire et son personnel bénéficient de l'action du Service Sécurité et Radioprotection et du Service Patrimoine et Infrastructures, éléments centraux dans la mise en place des infrastructures adaptées aux projets dans le cadre de conditions de sécurité optimale, et ce dans l'ensemble des bâtiments du laboratoire, incluant halls d'expérience et ateliers de fabrication et montage. Deux assistants de Prévention (un pour le site de Grenoble, et un pour le site de Modane) ont en charge la surveillance et le suivi de la mise en œuvre des consignes de sécurité sur chacun des sites.

SERVICE ADMINISTRATIF ET FINANCIER

Membres permanents

Louis Coppola, Colette Deslorieux (cheffe de service jusqu'en 2021), Isabelle Dos-Santos, Valérie Favre, Agnès Lucas, Cécile Martin, Johana Paquien, Françoise Petiot, Alain Retailleau (chef de service depuis 2021), Françoise Revillon, Christine Servoz-Gavin, Cécile Vannier, Anic Vey.

Le Service Administratif et Financier (SAF) assure le lien avec l'IN2P3, les services des tutelles du laboratoire, la Délégation régionale du CNRS, l'Université Grenoble Alpes (UGA) et Grenoble INP. Le service traite la gestion administrative des personnels, la gestion financière et budgétaire du laboratoire, l'accompagnement au suivi des contrats de recherche et des contrats industriels. Garant de la réglementation administrative, le service apporte assistance et conseil aux responsables d'équipes et 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 (20 recrutements/an), des conventionnements de stage (70 stagiaires/an) ainsi que l'accueil de 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.

Il tient à jour les bases de données du système d'information RH du laboratoire pour être en capacité de répondre aux enquêtes des différentes tutelles.

Avec les correspondants formation du laboratoire, le pôle ressources humaines coordonne et met en œuvre

le Plan de Formation de l'Unité (PFU) : recensement des demandes de formation, diffusion des offres de formation, instruction des demandes d'inscription (320 demandes de formation exprimées au PFU en

2019, 139 agents se sont formés, 185 formations ont été suivies). Il assure également la gestion des crédits affectés à la formation permanente des agents.

Le pôle ressources financières

Le pôle ressources financières assure l'élaboration et le suivi du budget du laboratoire. En 2021, le budget du laboratoire s'élève à 13,5 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 ressources financières assure la programmation, l'exécution et le suivi consolidé des données budgétaires selon les dispositions de la Gestion Budgétaire et Comptable Publique (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 chargés

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) du laboratoire, et assure régulièrement la justification d'exécution des contrats. De 2019 à 2021, 48 contrats de recherche et prestations ont été gérés, dont 9 contrats européens et 8 contrats ANR. Le LPSC émerge également à plusieurs autres dispositifs de soutien à la recherche dont un Institut de Recherche Technologique (IRT NANOEELEC), trois Labex (ENIGMASS, FOCUS et PRIMES), un Equipex (BEDOFIH) et deux Equipex+ (PACIFICS, NEWGAIN).

Le pôle logistique

Le pôle logistique a en charge la réception des commandes et la gestion des véhicules administratifs du site de Grenoble. Il assure également la fonction vagemestre sur l'agglomération grenobloise.

Faits marquants

De 2019 à 2021, le Service Administratif et Financier a consolidé sa structuration en trois pôles, et a fait évoluer l'organisation des pôles ressources humaines et ressources financières afin d'intégrer la mise en œuvre du télétravail au sein de ses équipes et garantir la continuité de service avec l'ensemble des agents du laboratoire. Ainsi, avec le soutien du service informatique, plusieurs applications internes ont été développées afin de dématérialiser les circuits de demande de stages, de demande de participation aux conférences, de demandes d'achat, de demandes de mission.

En 2019, le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) a été intégré au LPSC. Les procédures administratives et financières ont été mises en commun, suite à un travail préparatoire de 12 mois, incluant la dimension distancielle afin d'intégrer la gestionnaire administrative de Modane au sein du pôle ressources financières.

En 2019, dans la poursuite de l'application des règles de la GBCP et en lien avec le plan de déploiement du système d'information financier du CNRS, le processus de formalisation du service fait a été mis en œuvre au LPSC, en formalisant les étapes de réception des biens commandés et la certification de l'exécution du service fait. Un formulaire informatique de suivi du service fait a ainsi été développé.

La Délégation Globale de Gestion Financière avec l'UGA n'ayant pas été renouvelée, le pôle ressources financières a dû intégrer en 2019 le système d'information financier de l'université. Le budget du laboratoire, et tous les actes financiers associés, sont désormais enregistrés dans les applications propres à chacune des deux tutelles principales, GESLAB pour les crédits CNRS, SIFAC pour les crédits UGA. Trois gestionnaires ont été formés à l'application SIFAC.

En 2020, le LPSC et la délégation régionale Alpes ont fait l'objet d'un audit de l'Inspection Générale des Finances, pour lequel le SAF a été mis fortement à contribution.

La pandémie mondiale Covid a marqué les années 2020 et 2021, obligeant à un suivi plus spécifique des agents (situation de santé et de télétravail). La dématérialisation des activités a été affinée permettant désormais d'intégrer plus communément le télétravail dans le fonctionnement normal du service.

En 2021, le règlement intérieur du laboratoire a été révisé, intégrant notamment les évolutions des dispositions réglementaires des trois tutelles ainsi que les nouvelles dispositions relatives au télétravail (télétravail flottant et situations exceptionnelles).

SERVICE COMMUNICATION & DOCUMENTATION

Membres permanents

Audrey Colas, Emmanuelle Vernay (Cheffe de service).

Le service communication & documentation a un rôle de support aux activités de communication du LPSC et de son personnel. Son implication peut aller de l'organisation complète de l'événement à un rôle de conseil, de fournisseur de ressources, de créateur de contenus ou de matériels. Il a en charge l'organisation logistique des conférences scientifiques. Il intervient dans les actions de communication interne ou institutionnelle et dans les actions destinées au grand public et aux scolaires. L'activité documentation assure la fourniture de documents et le suivi des productions scientifiques des personnels du laboratoire, contribuant ainsi à la visibilité du LPSC en direction de ses tutelles et des instances d'évaluation.

Missions et organisation

Le service communication & documentation initialement constitué de deux agents soit 1,5 ETP (Équivalent Temps Plein) : IR (Ingénieure de Recherche), T (Technicienne) a évolué en septembre 2020 pour atteindre 2 ETP : IR, AI (assistante ingénieure). Ce changement a permis une nouvelle répartition des tâches, les agents ayant dorénavant respectivement la responsabilité de l'activité documentation et de l'ensemble des activités communication. L'assistante de communication assure, en binôme avec un personnel physicien, le rôle de correspondante communication du laboratoire vis à vis de ses tutelles. Elle anime un Comité Technique Communication (CTC) interne, formé de membres de la direction, et de personnels scientifiques et techniques représentant les différentes thématiques de recherche et services du LPSC. Impliquée dans l'ensemble des actions de communication du laboratoire (interne, tout public, institutionnelle, scientifique, événementielle, réseaux sociaux...), elle anime en outre des groupes de travail sur des sujets inhérents à la communication : reportage photo,

photothèque, évolution du site web, plaquette de présentation du laboratoire, réseaux sociaux, matériels de communication... Les activités de communication du laboratoire ont été fortement perturbées par la pandémie de COVID-19, et nombre d'événements ont malheureusement été annulés, reportés, ou maintenus en version "tout distanciel", ou bien encore "hybride" lorsque possible. On se reportera au chapitre "Communication et partage des connaissances" pour une description des principales activités de communication sur la période 2019-2021.

L'activité documentation couvre pour le LPSC, la gestion des ressources documentaires (fonds et abonnements), la fourniture de documents et le suivi des productions scientifiques des personnels du laboratoire. Fortement impliqué dans la gestion des publications de l'ensemble des laboratoires de l'IN2P3, le service a une grande partie de son activité dédiée à veiller à l'exhaustivité et à la qualité des métadonnées dans les bases INSPIRE et HAL. L'acquisition des prérogatives d'administrateur du portail HAL-IN2P3, de modérateur et de référent structure suite à une formation du Centre pour la Communication Scientifique Directe (CCSD) en décembre 2019 a entraîné une forte augmentation de la charge de travail et des échanges avec les différents personnels IN2P3 pour le traitement de leurs publications.

SERVICE DÉTECTEURS ET INSTRUMENTATION

Membres permanents

Mohammed Chala, Florent Collovati, Olivier Guillaudin, Murielle Heusch, Pierre de Lamberterie, Sara Marcatili, Julien Marpaud, Marc Marton, Jean-François Muraz (chef de service depuis 2020), Adeline Richard, Nadine Sauzet, Patrick Stassi (chef du service de 2003 à 2020), Clément Thomasse, Olivier Zimmermann.

Crée en 1998, 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 accélérateurs, les détecteurs de particules, le spatial 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 (UGA), 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.

Composé de 14 personnes fin 2021 (5 IR dont 2 PhD, 4 IE, 4 AI, 1 T), le SDI est organisé en quatre pôles de compétences (voir détails au § compétences) :

- Développements détecteurs,
- Études, montage, intégration, tests,
- Contrôle-commande et acquisition des données,
- Chimie et matériaux.

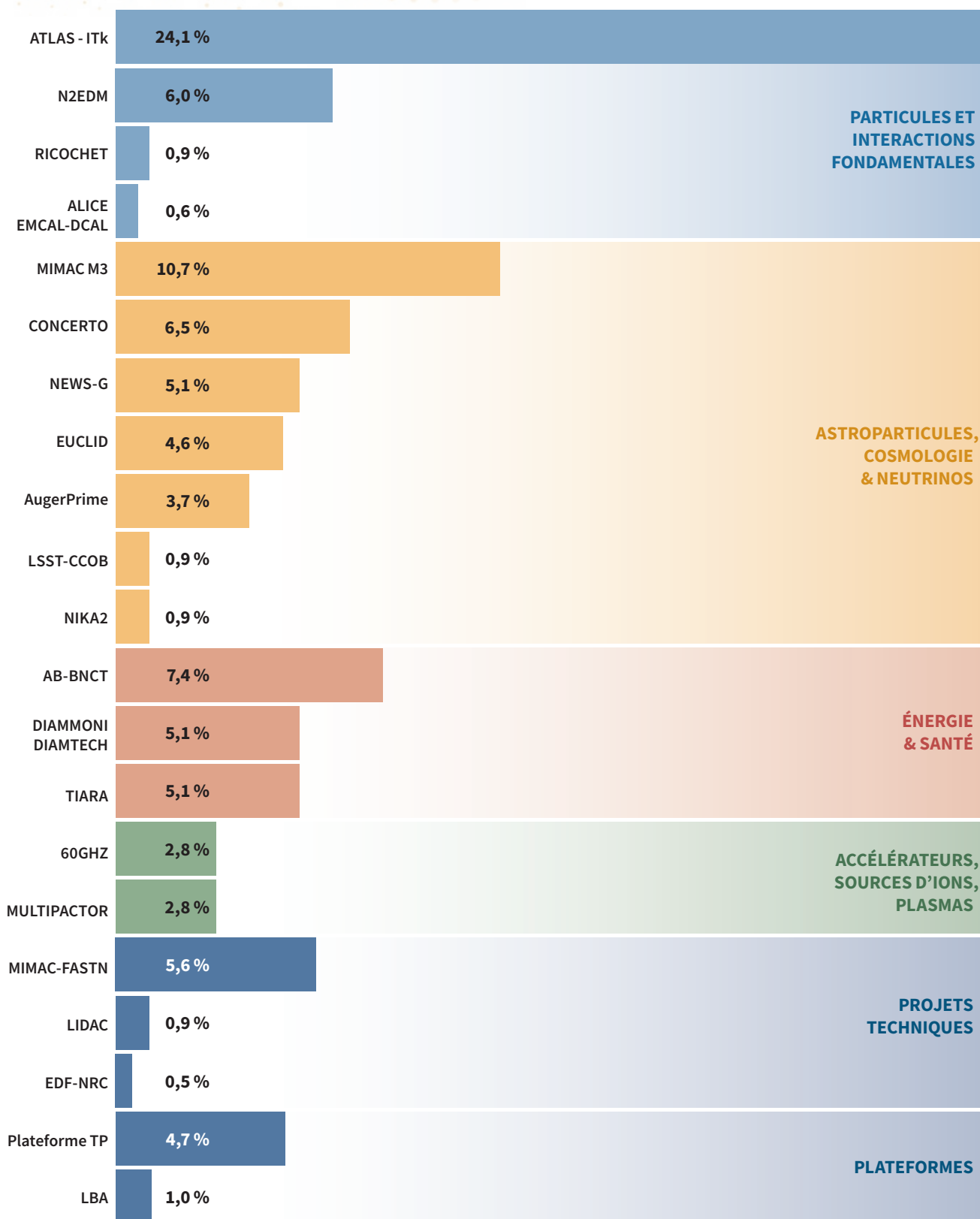
Implications sur les projets scientifiques et techniques

De 2019 à 2021, le SDI a contribué à une vingtaine de projets. La majorité des personnes du service est impliquée dans plusieurs projets à des niveaux de

responsabilités différents. Au cours de cette période, le SDI a assuré la responsabilité technique de 12 projets au laboratoire dont une responsabilité nationale (Auger-Prime) cumulée avec la fonction de chef de projet adjoint de l'observatoire Pierre Auger (Argentine) et une responsabilité scientifique nationale (TIARA).

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).

2019-2021 : Implications RH par axe thématique et par projet



De 2019 à 2021, les membres du SDI ont consacré 86 % de leur temps sur projet (soit 10.81 FTE/an), les 14 % de temps restants (soit 1.94 FTE/an) ont été consacrés aux nombreuses fonctions institutionnelles assumées par le service (réseaux métiers, COMité de DIRection,

Conseil Scientifique, Conseil d'Unité, Conseiller en Radio protection, Cellule de Revue Technique de Projet, Commission Locale d'Hygiène de Sécurité et des Conditions de Travail, Comité du Personnel Local, Comité Technique de Communication).

Focus et sélection de faits marquants durant la période 2019-2021



(Crédit : P. Stassi, LPSC, CNRS).

AugerPrime

Le SDI assure la responsabilité technique nationale de ce projet. Après avoir piloté et contribué à

l'assemblage et aux tests de 90 SSD (Scintillators Surface Detectors), le SDI a organisé début 2019 l'expédition des SSD vers le site de l'observatoire Pierre Auger (Argentine).

EUCLID - NISP

Le LPSC a pris en charge la réalisation des tests de compatibilité électromagnétique du détecteur photométrique infrarouge de l'instrument NSIP du télescope spatial EUCLID de l'ESA (Agence Spatiale Européenne). Dans ce cadre, le SDI a conçu et suivi la réalisation d'un cryostat innovant partiellement perméable aux micro-ondes et réalisé le programme de régulation en température de l'étage froid. Le service a également participé à l'ensemble des tests des modèles de vol des capteurs infrarouges effectués en chambre anéchoïque chez Airbus à Toulouse.

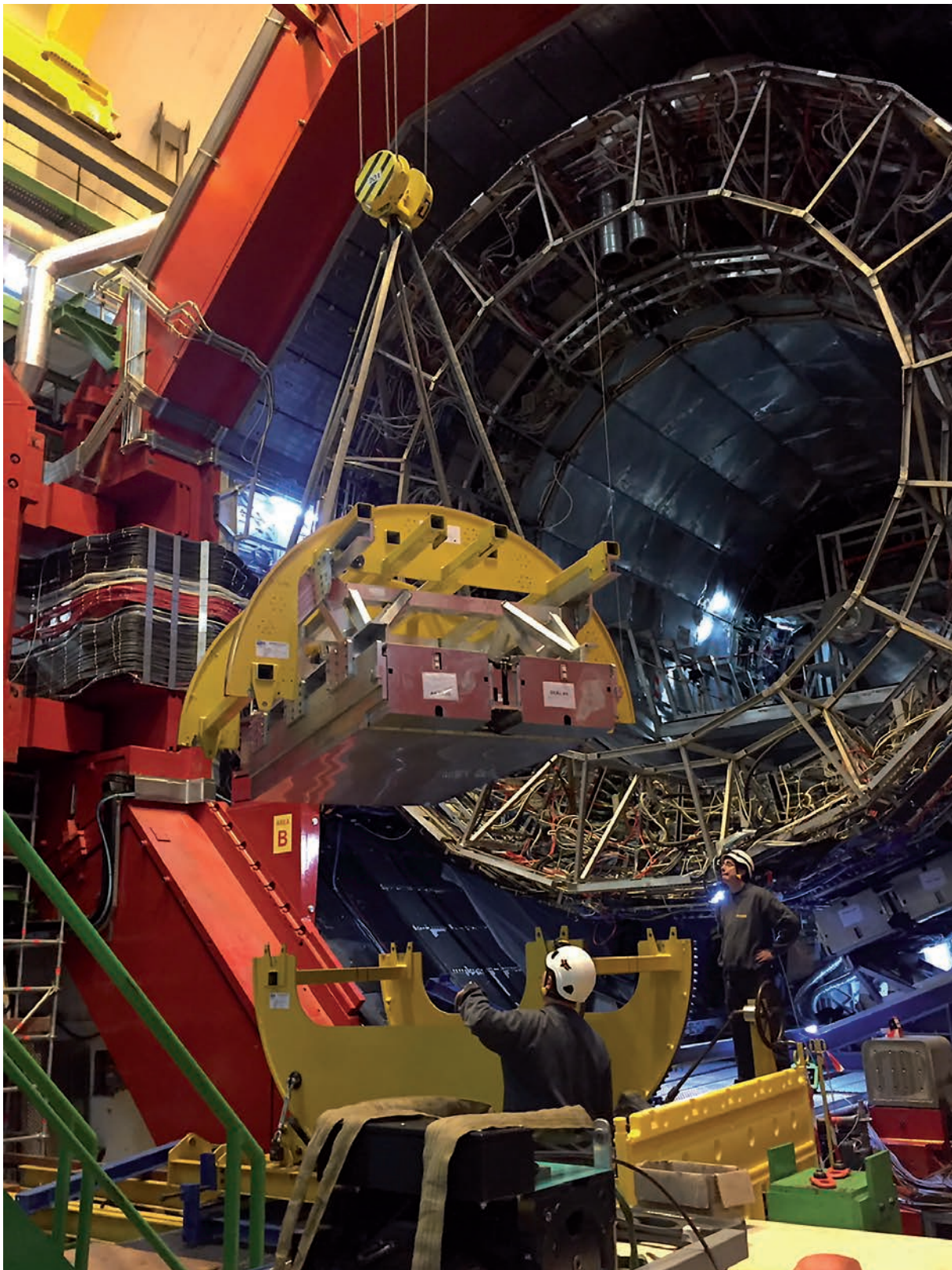


(Crédit : P. Stassi, LPSC, CNRS).

ALICE EMCAL-DCAL

Depuis 2009, le SDI assure la coordination technique de ce projet. Lors du deuxième arrêt long du LHC (LS2), le détecteur de photons PHOS nécessitant une maintenance importante, l'équipe du SDI, qui possède l'expertise de ces opérations spécifiques,

a contribué à l'extraction puis à la réinsertion de 3 modules du calorimètre électromagnétique DCAL et de 3 modules PHOS. Au total, pas moins de 30 tonnes de détecteurs ont été ainsi extraits en 2019 puis réinsérés début 2020. À cette occasion, deux nouveaux modules du CPV (Charged Particle Veto) ont également été installés.



(Crédit : M. Marton, LPSC, CNRS).

Compétences et moyens matériels

De par la diversité des profils constituant le 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 développements 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), radiodétection, mais aussi les simulations physiques et multiphysiques (GEANT4, SRIM, COMSOL, HFSS) ainsi que l'analyse et l'interprétation des données (ROOT, C++, Python).

Pôle études, montage, intégration, tests

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

Ce pôle assure le développement d'applications de contrôle-commande, d'acquisition de données et d'automatisation (centralisées ou distribuées, câblées ou sans fil, embarquées...). Les technologies logicielles utilisées sont notamment LabVIEW, C et C++, EPICS, Python, Ladder et Javascript.

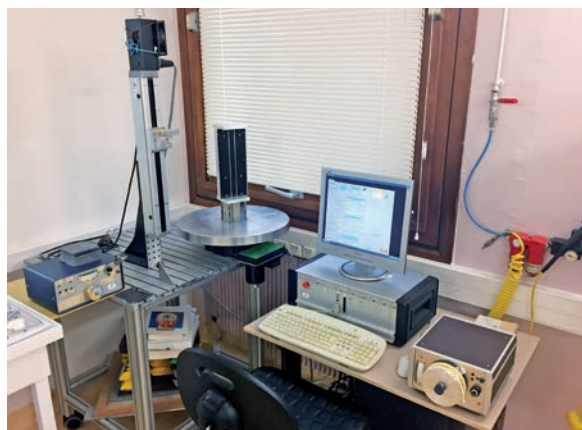
Pôle chimie et matériaux

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.

Fin 2018 puis en 2019, ces compétences ont pu être renforcées grâce à l'arrivée de deux Ingénieurs de Recherche spécialisées respectivement en photodétection, appliquée à la physique médicale, et en technologie des détecteurs gazeux, appliquée à la spectrométrie et à la dosimétrie neutronique. 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

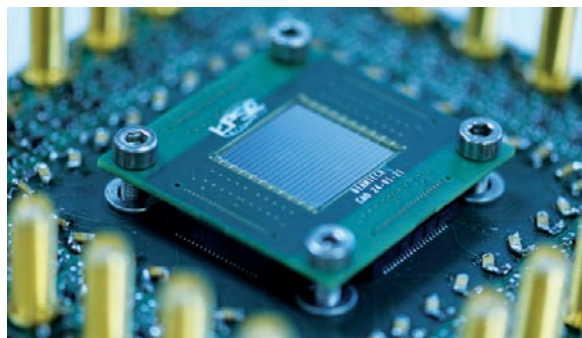


(Crédit : J.-F. Muraz, LPSC, CNRS).

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 mm² et réalise régulièrement des tissages, notamment dans le cadre de prestations.

Montage de diamants

Depuis 2010, le SDI a développé des techniques spécifiques pour le montage de diamants de toutes tailles (jusqu'à 400 mm²). 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).



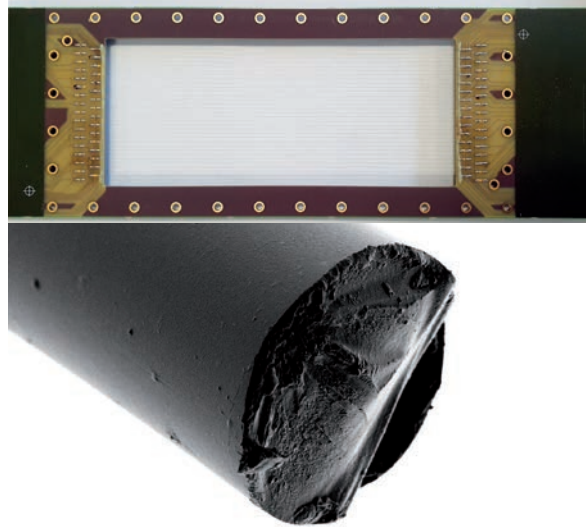
(Crédit : V. Moncorge, LPSC, CNRS).

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), la photodétection (amélioration de la résolution en temps - 100 ps - par couplage de SiPM et détecteurs Cherenkov) ou encore la radiodétection (développement et simulation d'antennes multibandes).

CHANGE

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 Nouvelles GENération (CHANGE) hautement transparentes basées sur des fils d'aluminium et de carbone. Plusieurs prototypes ont été réalisés et annoncent une technologie très prometteuse.



Institut Néel/Nanofab EHT = 2.00 kV 2 µm Mag = 1.66 K X Signal A = SE2 Date : 24 Jun 2020
WD = 3.2 mm TR Angle = 45.0° TR Cam = C11 Dyn/Focus = Off Time : 14:27:52

(Crédit : G. Charles, IJCLab, CNRS (haut) & J.-F. Motte, NANOFab, Néel, CNRS (bas)).

Le SDI contribue également fortement aux activités de valorisation du laboratoire. Depuis 2003, il est en charge de la gestion technique du Laboratoire de mesure des Basses Activités (LBA) et participe à divers programmes dans le domaine des applications médicales et de la neutronique. Le SDI réalise également de nombreuses prestations (tissage de fils, expertise détecteurs, expertise contrôle-commande) pour des opérateurs comme le CEA, l'IRSN ou encore EDF-STD.

Activités de formation

Le SDI est également impliqué dans des activités de formations, internes dans le cadre de la formation permanente de la délégation régionale Alpes avec les

stages d'initiation à la programmation graphique LabVIEW, mais également au sein de l'Université Grenoble Alpes, où des membres du service ont assuré des travaux pratiques et des travaux dirigés dans divers cursus. De plus, plusieurs interventions dans les lycées ont eu lieu, dans le but de promouvoir les activités et les métiers de l'instrumentation auprès des jeunes.

SERVICE ÉLECTRONIQUE

Membres permanents

Germain Bosson (jusqu'à mi-2021), Jean-Luc Bouly, Julien Bounmy, Olivier Bourrion (chef de service), Joël Bouvier (jusqu'à mi-2021), Ludovic Eraud, Laurent Gallin-Martel, Christophe Hoarau, Eric Lagorio, Nicolas Ponchant, Fatah Rarbi, Olivier Rossetto, Jean-Pierre Scordilis (jusqu'à mi-2021), Emmanuel Tourba, Damien Tourres, Mahfoud Yamouni.

Membres non permanents du service

Cairo Caplan (CDD), Elian Conrat (apprenti), Oumaïma Jaafoura (CDD mai 2020 → fev 2022), Malick Sene (CDD nov 2020 → décembre 2021), Lucas Tribouilloy (apprenti sept 2018 → sept 2021), Abderrahmane Ghimouz (doct, post-doct, sept 2017 → août 2021).

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 15 agents permanents (fin 2021), il conçoit les systèmes électroniques ou les capteurs PCB pour les expériences de physique du laboratoire. Le service est organisé en quatre sous-groupes : électronique système, microélectronique, Conception Assistée par Ordinateur (CAO) de circuits imprimés et support et instrumentation.

Le sous-groupe électronique système (6 permanents + 1 non-permanent) 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 sous-groupe microélectronique (3 permanents + 2 non-permanents) 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 sous-groupe CAO de circuit imprimés (2 permanents + 1 non-permanent) 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 sous-groupe support et instrumentation (4 permanents) 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

Chaque année au cours de la période 2019-2021, le service électronique a conçu et fait fabriquer une trentaine de circuits imprimés différents de complexités et technologies diverses. Les contributions principales ont été sur les projets de radioastronomie millimétrique (CONCERTO), de physique des particules (ALICE) et de physique nucléaire et applications médicales.

Projet CONCERTO : Électronique de lecture pour détecteurs à inductance cinétique (KIDs)

Le service électronique a conçu et mis en service le système d'acquisition de l'instrument CONCERTO. Il est installé dans 5 châssis microTCA qui sont directement intégrés dans la structure mécanique de l'instrument. La partie acquisition comporte 12 cartes d'excitation et de lecture de KIDs fonctionnant avec des convertisseurs à 2 Géch/s et une chaîne radiofréquence couvrant une plage de 1,3 GHz à 3 GHz. Chacune de ces cartes met en œuvre directement sur FPGA le traitement du signal de premier niveau pour bénéficier d'une forte parallélisation des calculs (voir figure 1). Le service a également conçu l'électronique de pilotage de l'interféromètre Martin-Puplett. Pour ces réalisations, le service a fourni les logiciels de pilotage et a assuré les tests de validation pendant intégration et lors de l'installation sur le site d'observation à APEX au Chili.

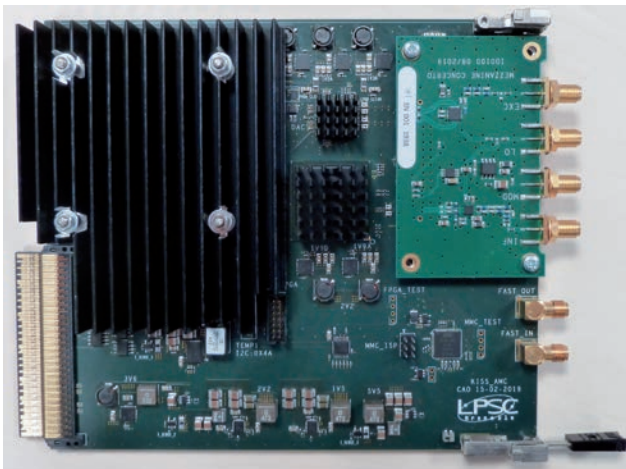


Figure 1. (Crédit : Service électronique, LPSC, CNRS).

Carte d'excitation et de lecture de détecteurs KIDs. La partie acquisition comporte 12 cartes d'excitation et de lecture de KIDs fonctionnant avec des convertisseurs à 2 Géch/s et une chaîne radiofréquence couvrant une plage de 1,3GHz à 3 GHz. Chacune de ces cartes met en œuvre directement sur FPGA le traitement du signal de premier niveau pour bénéficier d'une forte parallélisation des calculs.

Projet ALICE : Firmware pour le système d'acquisition commun et R&D électronique de lecture du calorimètre électromagnétique avant (FoCAL)

En 2018, le LPSC a pris la responsabilité du firmware de la carte d'acquisition Common Readout Unit (CRU) de l'expérience ALICE. Cette électronique, installée à 500 exemplaires, est un service commun utilisé par 10 sous-détecteurs d'ALICE. Chacune permet d'interfacer le front-end avec 24 fibres optiques à 4.8 Gb/s, le système de déclenchement central de l'expérience avec un lien à 10 Gb/s et le système d'acquisition avec une interface PCI express. L'enjeu a été de fournir un firmware mutualisé et adapté au maximum à chaque sous-détecteur, performant et qualifié. Le tout en assurant un support à chaque utilisateur.

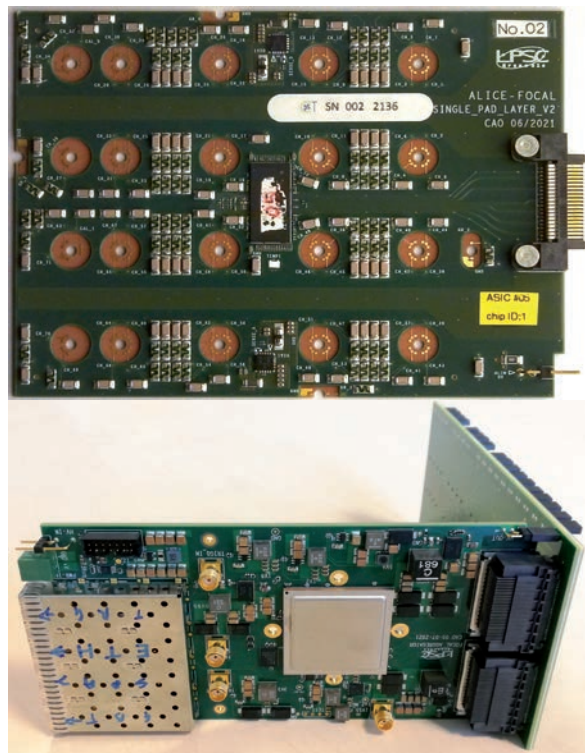


Figure 2. (Crédit : Service électronique, LPSC, CNRS).

Prototypes de l'électronique de lecture du calorimètre électromagnétique avant (FoCal) de l'expérience ALICE au LHC. Ce projet de détecteur a nécessité la conception de plusieurs cartes électroniques, dont (en haut) une carte front-end comprenant l'ASIC de lecture et le capteur silicium de 72 pixels collé et bondé et (en bas) la carte numérique de contrôle et de lecture.

Grâce au travail accompli et à la visibilité acquise sur le projet CRU, le LPSC a été sollicité pour s'impliquer dans la conception de l'électronique de lecture du calorimètre électromagnétique avant (FoCal) de l'expérience ALICE au LHC. Ce projet de détecteur a nécessité la conception de différentes cartes électroniques : carte front-end comprenant l'ASIC de lecture et le capteur silicium de 72 pixels collé et connecté par bonding, la carte d'interconnexion des 18 couches et la carte numérique de contrôle et de lecture, qu'elle interface avec la carte CRU (voir figure 2).

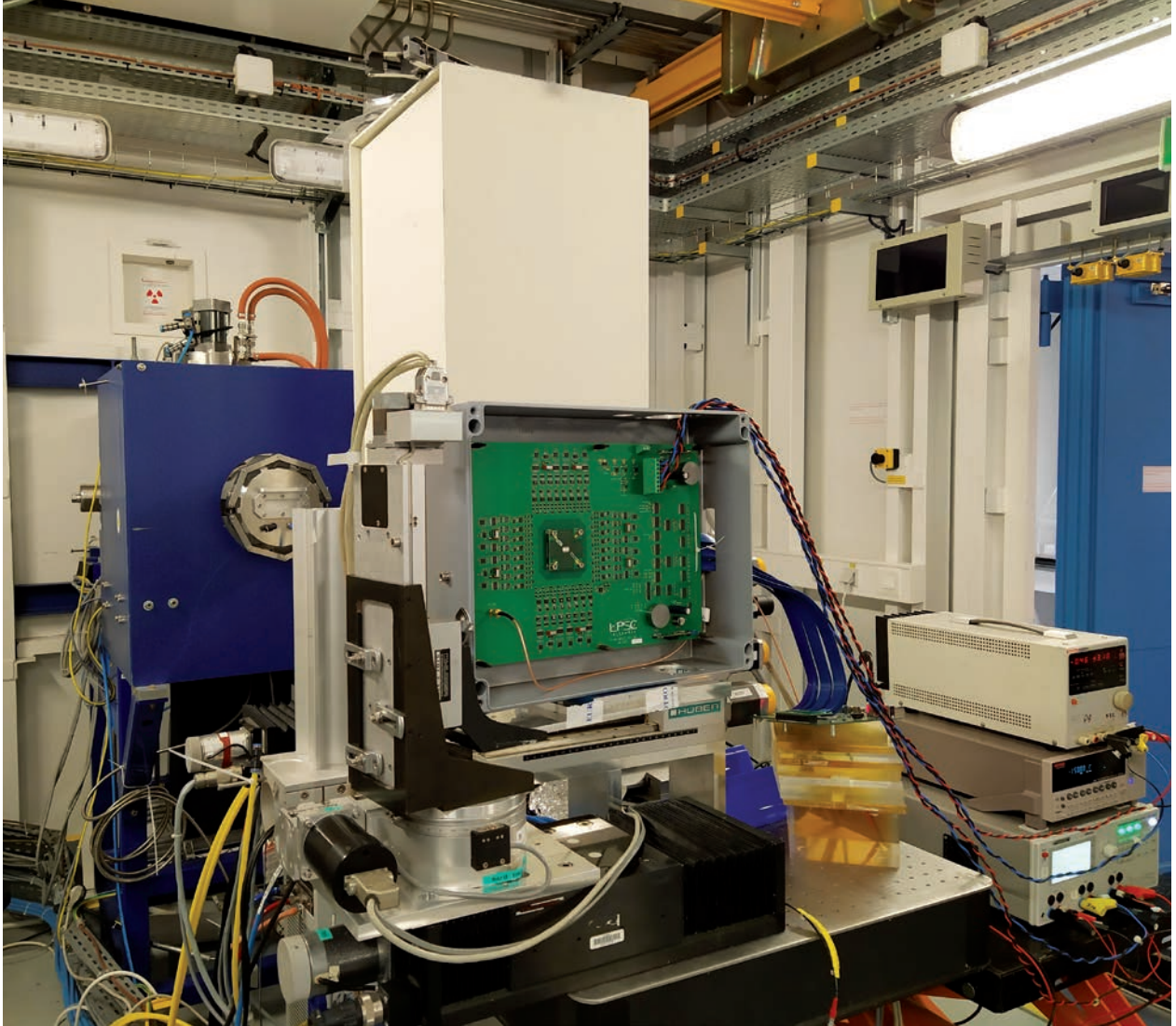


Figure 3 (Crédit : M.-L. Gallin-Martel, LPSC, CNRS).

Premier prototype du détecteur pour le projet IDSYNCHRO (MRT à l'ESRF). Le service a développé un dispositif permettant la localisation des micro-faisceaux ainsi que la mesure de la charge. Le premier prototype de ce détecteur a été réalisé en électronique discrète et comportait 32 codeurs de charges (QDC). Il a été validé en 2021 lors de tests à l'ESRF.

Projets physique nucléaire et applications médicales

Le service a développé des électroniques de lecture de détecteurs diamants 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 fournit également le firmware et le logiciel pour chacune des électroniques de lecture.

Pour le projet IDSYNCHRO (MRT à l'ESRF) le service a développé un dispositif permettant la localisation des micro faisceaux ainsi que la mesure de charge. Le premier prototype, réalisé en électronique discrète, comportait 32 codeurs de charges (QDC) et a été validé en 2021 lors de tests à l'ESRF (voir figure 3). Une version intégrée (ASIC) de ces QDC a également été développée par un élève ingénieur en alternance au LPSC (PHELMA, Grenoble INP). Cet ASIC est en cours de validation à l'ESRF et sera utilisé pour équiper la version finale du moniteur faisceau IDSYNCHRO (150 QDC).

SERVICE ÉTUDES ET RÉALISATIONS MÉCANIQUES

Membres permanents

Patrick Boge, Romain Bourroux, Pierre Olivier Dumont, Nicolas Emeriaud, Calogero Geraci, Julien Giraud, Denis Grondin (chef de service), Mile Kusulja, Johann Menu, Dominique Morotti, Yvan Odievre, Éric Perbet, Gilles Raffin, Samuel Roni, Sébastien Roudier, Francis Vezzu, Lucie Vivargent.

Membres non permanents du service

Thibault Bringout, Mathieu Da Silva, Nicolas Drop, Angelo Guiga, Yann Herpin, Florian Kiener, Stéphane Latil, Mickaël Legrand, Helvio Lucas Henriques.

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.

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 2021, de 18 agents et est organisé en trois activités :

- Bureau d'Études : 3 IR, 3 IE, 3 AI
- Atelier : 1 IE, 4 AI, 2 T
- Montage & Contrôle : 2 AI.

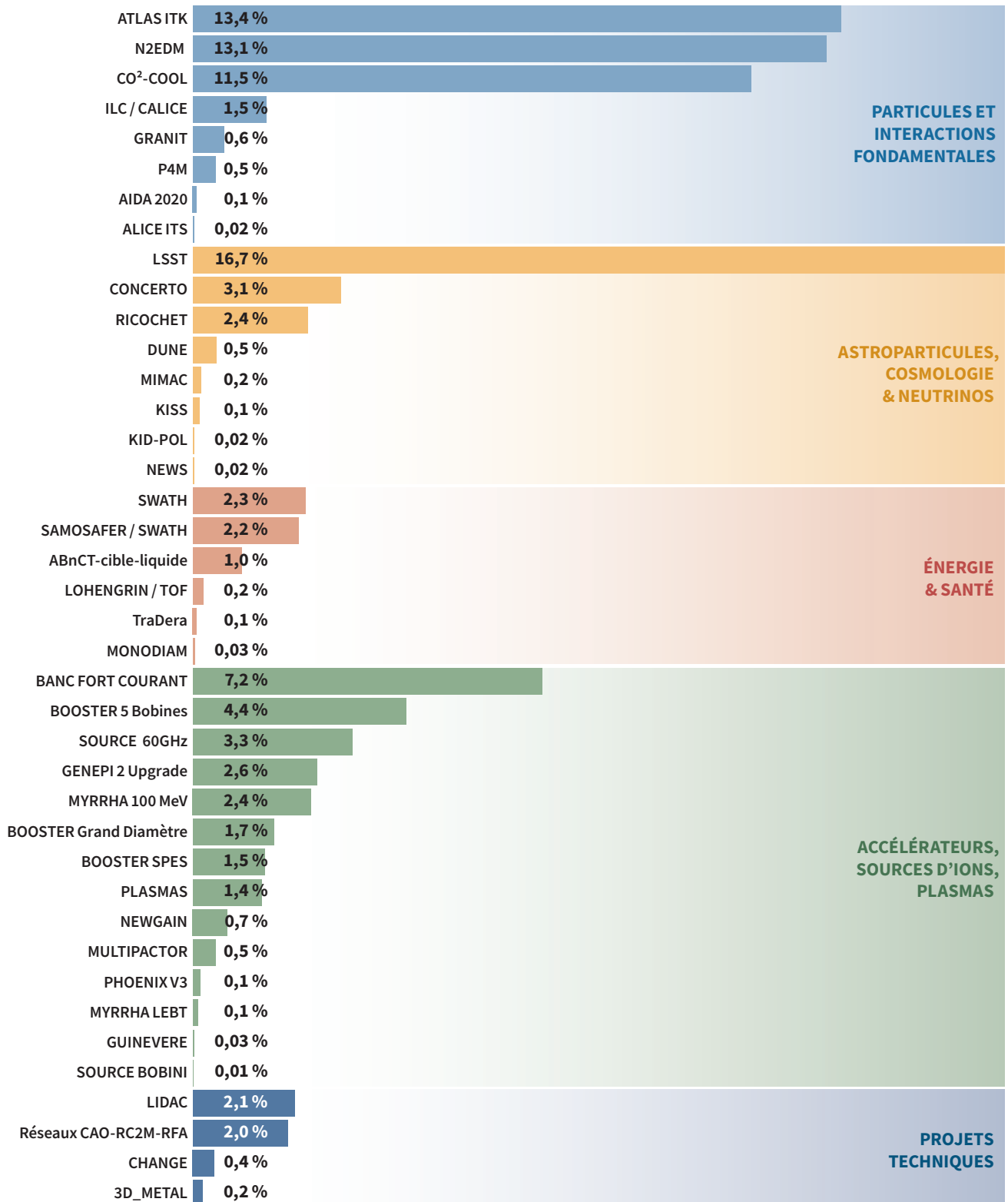
Le SERM dispose d'une expertise reconnue dans le domaine de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de la gestion de base de données techniques. Cela lui permet de jouer un rôle important de soutien auprès d'autres utilisateurs du laboratoire (38 agents, répartis sur 5 services) et ainsi d'accroître les compétences individuelles et collectives en conception mécanique. Deux de ses membres sont fortement impliqués dans le projet de déploiement du nouvel outil de CAO (3D EXPERIENCE) tant au LPSC qu'à l'IN2P3.

Les membres du SERM assurent également la responsabilité ou la coordination technique de projets. Un agent assure la coordination nationale IN2P3 du Réseau Calcul Mécanique et Multiphysique (RC2M) de l'IN2P3 ainsi que l'organisation des écoles de calculs de l'Institut.

Le service est représenté dans plusieurs instances du laboratoire : CHSCTL (Commission d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail Locale), CPL (Comité du Personnel Local), CSP (Comité de Suivi des Projets), CU (Conseil d'Unité). Il compte aussi le responsable des moyens CAO du laboratoire.

Implications sur les projets scientifiques et techniques

SERM : tableau répartition RH par axe thématique et par projet pour la période 2019-2021



De 2019 à 2021, le SERM a contribué à 40 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 conception et la réalisation complète d'instruments.

Le service assure aussi la coordination technique au LPSC pour 6 projets : AB-NCT - Cible Li liquide, GRANIT, LSST (Chargeur de filtre), n2EDM (Mapper et Switch UCN), SWATH, ainsi que les coordinations mécaniques de 3 projets : ILC, CO²-COOL et LIDAC.

Les répartitions des RH sur projets (page 165) reflètent la part des projets majeurs du service, comme LSST, n2EDM, ATLAS-ITK et CO²-COOL, les sources d'ions.

Focus et sélection de faits marquants durant la période 2019-2021

Plusieurs faits marquants relatifs aux projets dans lesquels le SERM est impliqué ont jalonné les activités de ces trois dernières années :

ATLAS CO²-COOL

Le SERM assure la coordination technique de ce projet qui porte sur le développement et la réalisation du bloc accumulateur d'une station prototype de refroidissement à CO² diphasique fonctionnant entre -40°C et 20°C, destinée à maintenir la pression, donc la température constante des futurs détecteurs du LHC pour la phase II prévue à partir de 2027 au CERN.

Il s'agit d'un équipement sous pression de classe IV qui a nécessité la fourniture d'un dossier constructeur.

Cet équipement a été livré au CERN début 2022 et fonctionne parfaitement ; son optimisation se poursuit afin de lancer la construction de 15 exemplaires.



(Crédit photo © SERM/LPSC/CNRS).

Le bloc accumulateur CO² terminé dans l'atelier du LPSC.



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 de l'expérience.
- le Switch motorisé, (système d'aiguillage, constitué de guides UCN mobiles ; l'intégration finale du switch UCN est prévue en 2022 à PSI.

(Crédit photo © Vincent MONCORGE/LPSC/CNRS).
Switch UCN motorisé en phase de montage.

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).

Ce 1^{er} équipement manipulant des filtres de forte valeur financière (1,5 M\$) a été livré en 2021 et fonctionne parfaitement. ; le second exemplaire sera livré en 2022.



(Crédit photo © Gaelle SHIFRIN/CC-IN2P3/CNRS).

Insertion réussie des filtres optiques dans la boîte de stockage avec le loader n°1 à SLAC (Stanford National Accelerator Laboratory).



(Crédit photo © SERM/LPSC/CNRS). - Installation de la section d'essai dans l'expérience SWATH au LPSC.

SWATH – SAMOSAFER

Le SERM assure la coordination technique du projet SWATH (H2020) qui étudie depuis le printemps 2015 par simulation numérique et par l'expérience le changement de phase et les échanges thermiques en paroi des sels fondus à haute température (études sur la mesure de pression différentielle).

L'exploitation de la boucle à sels fondus est réalisée avec succès depuis début 2018. Ces projets sur les sels fondus se sont inscrits dans le Projet Européen SAMOFAR H2020 sur 4 ans (2015-2019) et dorénavant via SAMOSAFER H2020 sur 4 ans (2019-2023) pour l'étude des réacteurs nucléaires de génération 4.

Mise à niveau des outils CAO, d'usinage et de métrologie

Le remplacement progressif de CATIA V5 et SMARTEAM depuis fin 2019 par le nouveau logiciel de CAO 3D Experience Platform de Dassault Systèmes, avec sa base de données performante, est une amélioration majeure des outils de conception mécanique, qui nécessite encore beaucoup d'efforts, notamment pour le support technique et la formation auprès des 38 utilisateurs du laboratoire.

L'évolution des outils s'est traduite aussi dans cette période par d'autres installations :

- Installation en 2019 d'un centre d'usinage à Commande Numérique cinq axes.
- Installation de la nouvelle salle de drapage composite (50 m²) et d'une chambre froide.
- Évolution du parc Impression 3D plastique dans la salle dédiée avec quatre machines.

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-imprégné carbone.
- Gestion de projets, coordination technique, assurance produit, documentation (coordination nationale IN2P3 de SMARTEAM), 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 CATIA V5 et 3D EXPERIENCE ; SMARTEAM (GDT : gestion de documentation technique), ATRIUM ; simulations/calculs : ANSYS.

Atelier Mécanique

Sur 445 m², 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 ; 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 : 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, lignes cryogéniques ; 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 GDT, à la FAO, au calcul, ainsi que dans le domaine du vide (détection de fuites).

- Responsabilité du groupe de travail ENOVIA qui a piloté le remplacement des logiciels CAO et GDT à l'IN2P3 en 2021, 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 calculs de l'IN2P3 (2019). 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 toutes liées à des projets du laboratoire. Elles se déclinent selon trois thématiques, en partenariat étroit avec l'ILL, le LNCMI et d'autres organismes (CEA, CERN...) :

Systemes de refroidissement

- Grands détecteurs : ATLAS ITK (CO2 diphasique).
- Refroidissement par cryostat He3 du spectromètre GRANIT à l'ILL.
- Conception de cibles liquides dans le cadre du projet AB-NCT.
- Refroidissement de sources d'ions.

R&D Matériaux (sels fondus et composites)

- Étude du changement de phase et des échanges thermiques en paroi des sels fondus à haute température : SWATH et SAMOSAFER.
- Structures composites ultralégères pour détecteurs (ALICE ITS et ATLAS ITK).
- Structures alvéolaires Longues en carbone-époxy / W (*bag molding*) et pièces structurelles de haute résistance (thermo-compression) : ITK, CALICE.

Intégration systèmes

(mécatronique-automatisme) : SWATH et LSST

**POUR EN
SAVOIR+**

Ressources Web

<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/services/mecanique/presentation>

SERVICE INFORMATIQUE

Membres permanents

Catherine Biscarat, Guillaume Dargaud, William Del Net, Thierry Descombes, Jérôme Fulachier, Christine Gondrand, Fabian Lambert (chef de service adjoint), Frédéric Melot (chef de service), Pascal Meyrand, Jérôme Odier, Joseph Piarulli.

Membres non permanents du service

Amélie Bernard (apprentissage), Maxime Jaume (CDD puis apprenti), Ludovic Leau-Mercier (CDD).

Le service informatique est composé d'une dizaine d'agents sur la période 2019-2021. Il s'organise en deux pôles : administration systèmes et réseaux et développements logiciel. Il répond aux besoins d'environ 230 utilisateurs du LPSC et fournit des solutions logicielles au bénéfice de collaborations nationales et internationales dont certaines ont plusieurs milliers de membres. Depuis mars 2020 et le COVID, le service informatique accomplit ses missions en adaptant ses pratiques, notamment avec le télétravail, et essaye d'anticiper les départs à la retraite de certains de ses agents afin de maintenir le même niveau d'activité.



(Crédit : Dargaud 2021, LPSC). - L'entièreté des serveurs informatiques du site de Grenoble est hébergée dans notre salle machine (8 baies de 48 unités).

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 nœud Tier-2 de la grille de calcul et de stockage WLCG.

Le pôle “Développement” 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.

Point sur les mouvements de personnels

Catherine Biscarat a quitté le LPSC fin 2019 pour le nouveau laboratoire L2IT, à Toulouse. William Del Net a rejoint le LPSC en avril 2020 sur un poste ouvert en NOEMI, en prévision du départ à la retraite de Pascal Meyrand.

L. Leau-Mercier, recruté en CDD principalement pour le projet EUCLID, pour 2 ans, à partir de novembre 2020 a quitté le LPSC en août 2021.

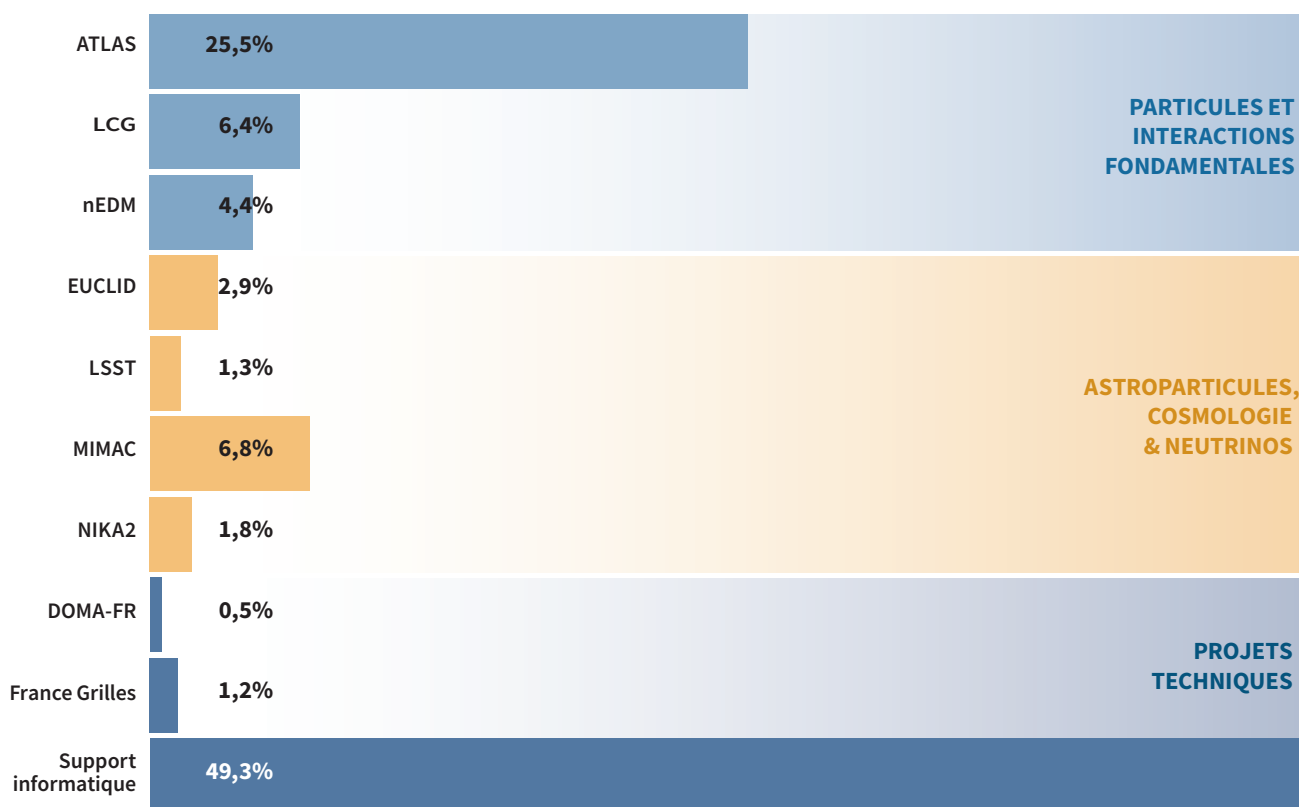
A. Bernard a effectué une année d’apprentissage en IUT réseau de septembre 2018 à juillet 2019. Maxime Jaume a commencé seize mois d’apprentissage en master 2 Manager en systèmes d’information spécialité Sécurité en octobre 2021.

Implications sur les projets scientifiques et techniques

Pendant les années 2019 à 2021, le service informatique a été principalement impliqué dans les activités suivantes :

- L’exploitation des infrastructures informatiques du laboratoire et le support des utilisateurs
- Le projet de développement AMI, principalement pour l’expérience ATLAS du CERN
- La mise en place de ressources de calcul et de stockage sur la grille pour les expériences LHC
- Plusieurs développements de contrôle commande pour les expériences Auger, le pilotage d’une sonde Plasma, LSST, Physique médicale
- Le développement du système d’acquisition de l’expérience MIMAC, ainsi que les outils de contrôle commande et de visualisation des données

Tableau répartition RH par axe thématique et par projet pour la période 2019-2021.



Compétences, moyens matériels et moyens logiciels

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...), nous avons au fil des années développé une expertise en traitement de métadonnées scientifiques dans le domaine de la physique des hautes énergies et nous nous sommes ouverts ces dernières années au calcul scientifique et au machine learning (ROOT, numPy, TensorFlow).

De nombreux moyens matériels ont été déployés ou mis en place entre 2019 et 2021. Douze nouvelles paires de fibres optiques ont été tirées vers le CNRS pour assurer la redondance et accroître la bande passante. Nos équipements constituant le cœur de réseau du site de Grenoble ont été mis à jour : les deux

anciens commutateurs avec des liens à 10 Gbits/s ont été remplacés par deux nouveaux avec des liens à 10, 25, 40 et 100 Gbits/s. Les performances des liens réseaux entre les serveurs de notre salle machine ont ainsi été grandement améliorées. Un contrôleur logiciel WiFi Cisco a été déployé pour remplacer le contrôleur matériel utilisé jusque-là, ceci afin d'éviter les reconfigurations automatiques de nos bornes WiFi qui avaient lieu de façon inopinée plusieurs fois par an. De nouvelles bornes WiFi ont également été déployées. Tous les anciens commutateurs, de presque 20 ans d'âge, gérant les accès aux prises réseau des bureaux ont été remplacés par de plus récents. Cela nous a permis d'éviter les pannes qui commençaient à perturber notre installation de plus en plus fréquemment, mais également de nous affranchir du protocole VMPS devenu obsolète et de le remplacer par le protocole RADIUS, beaucoup plus performant et sécurisé. Des systèmes de visioconférence ont été choisis, installés et configurés dans l'amphithéâtre et dans les salles 149 et 345. Ils offrent à nos utilisateurs

un service de visio-conférence très efficace pour l'organisation de leurs événements avec des participants ou des orateurs à distance. Enfin, un nouveau PUMA concernant le pool d'imprimantes communes a été effectué et a mené à l'installation d'un nouveau parc.

De nombreuses mises à jour logicielles ont également été apportées durant cette période. Un nouveau serveur VPN a été mis en place, avec une solution logicielle mise à jour et basée sur une configuration différente. Il a permis de supporter la montée en charge de l'utilisation à distance lors des différentes périodes de confinement ainsi qu'avec le développement du télétravail. Le serveur a également apporté une nette amélioration quant au suivi des connexions, les utilisateurs retrouvant à distance la même adresse IP pour leurs postes de travail que celle utilisée dans les locaux du LPSC. Le serveur de stockage lpsdata11 a été remplacé par lpsdata12, de capacité plus grande et avec le service Samba activé pour permettre l'accès aux postes Windows et Macs. Le logiciel de batch

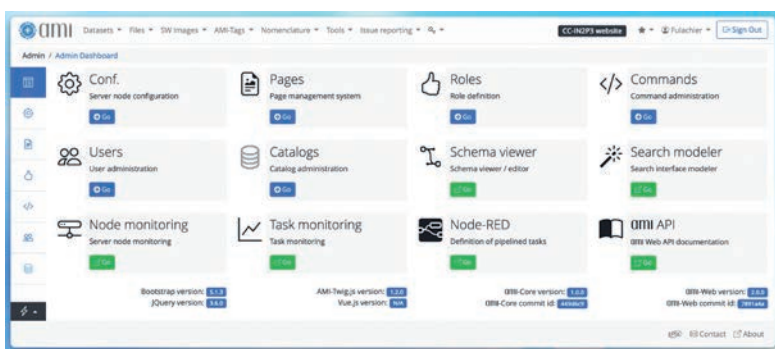
HTcondor a été installé sur les machines de calcul. Un serveur de stockage IRODS a été installé pour une utilisation par la Virtual Organisation France-Grilles. Le marché national MatInfo4 a été remplacé par MatInfo5, modifiant de façon substantielle le matériel achetable ainsi que les procédures d'achat. Enfin, de nouvelles applications de dématérialisation de formulaires ont été développées localement et mises en production : participation aux conférences, demandes de prêt de matériel informatique, service fait (pour les demandes d'achat, le suivi et la réception des colis), présence au LPSC (utile lors de la reprise après les périodes de confinement), PISTIL pour la gestion des missions (développée en attendant une application nationale) et accueil des visiteurs.

Nous avons également initié des réunions bisannuelles avec les responsables de services et d'équipes afin d'effectuer un bilan de leur utilisation de moyens informatiques ainsi qu'une prévision de leurs besoins futurs.

Compétences, moyens matériels et moyens logiciels

Écosystème AMI

Un effort particulièrement important a été fourni afin de finaliser l'écriture d'une nouvelle version de l'écosystème AMI (<https://ami.web.cern.ch/#documentation>), pour la gestion de métadonnées scientifiques. L'écosystème est composé de plusieurs briques logicielles (<https://ami.web.cern.ch/#ami>) permettant de sélectionner des données scientifiques par critères ainsi que d'agréger et de visualiser leurs métadonnées associées à tous les niveaux de la chaîne de production. La figure ci-dessous donne un aperçu des nombreuses fonctionnalités ajoutées ou améliorées (gestion de catalogues de métadonnées, gestion des serveurs de tâche, gestion des utilisateurs, monitoring, ...).



Pour la collaboration ATLAS, cette nouvelle version a été mise en production de façon progressive entre 2019 et 2021. Il est à noter que les bases de données AMI hébergées au CC-IN2P3 ont été transférées au CERN. La réplication entre ces deux sites, devenue inutile, a été stoppée.

Outre son utilisation depuis plus de 20 ans pour la collaboration ATLAS, la solution AMI a été sélectionnée pour plusieurs autres projets : NIKA2 (mise en place d'un site dédié utilisant AMI v2 pour gérer des métadonnées d'observation d'amas de galaxies), nEDM, n2EDM (utilisation de AMI v2 pour la création d'interface de monitoring sur des données d'acquisition en temps réel), avec l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG) pour des expériences spatiales (Rosetta, Philae...) et pour les applications dématérialisées de gestion en interne au LPSC.

(Crédit : Fulachier 2022, LPSC).

Interface d'administration de l'écosystème logiciel AMI. Chaque bloc est le point d'entrée d'une application Web permettant d'administrer en ligne un aspect technique de l'écosystème (droits utilisateurs, tâches d'acquisition, catalogue de métadonnées, monitoring de l'état des serveurs...).

Projet DOMA

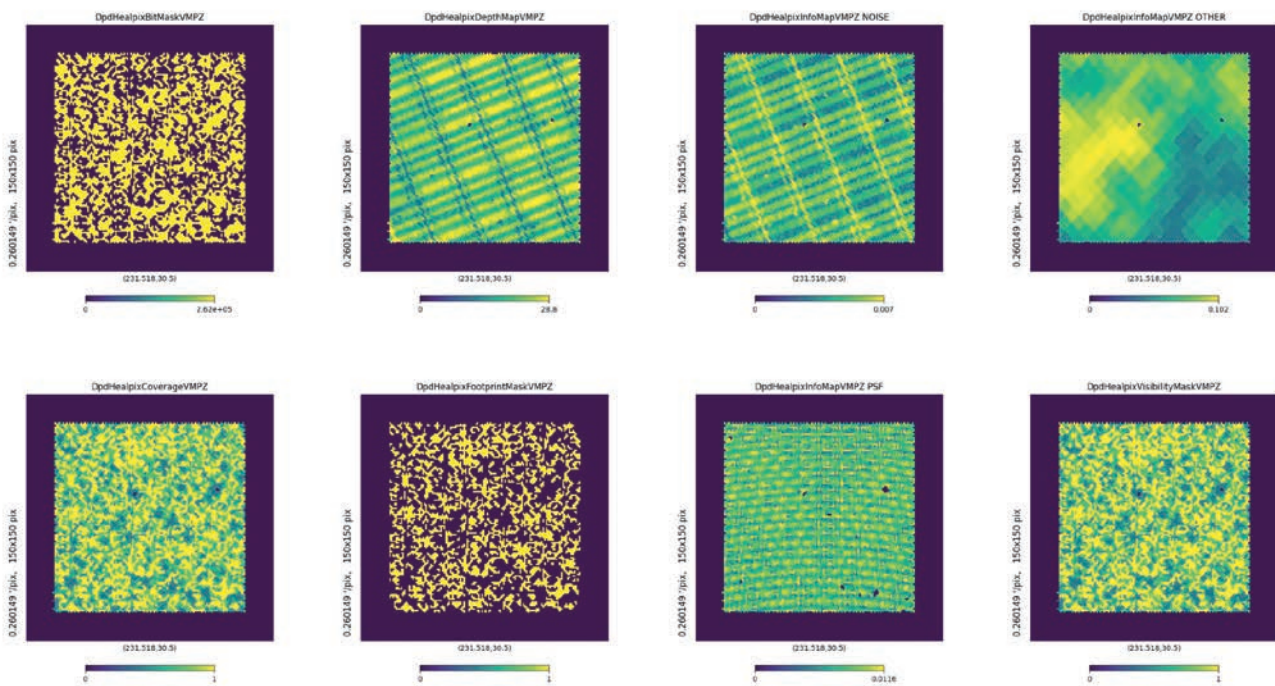
Nous participons au projet Data Organisation Management and Access (DOMA), projet de R&D IN2P3 dont le but est de trouver des solutions de stockage efficace et à moindre coût à l'horizon du HL-LHC. Une

demande de soutien projet a été soumise à la direction de l'IN2P3 en coordination avec plusieurs laboratoires de l'IN2P3 et le CC-IN2P3.

Projet Euclid

Nous avons la responsabilité du développement de VMPZ-ID, un sous-système du logiciel officiel d'analyse du futur télescope spatial Euclid. Il permet la génération offline de masques photométriques ainsi que la simulation de catalogues de galaxies à partir des données d'autres sous-systèmes et instruments en amont. VMPZ-ID occupe une place stratégique dans le pipeline d'analyse d'Euclid.

Nous sommes également responsables d'une partie de la validation scientifique en fournissant à d'autres sous-systèmes, en aval de VMPZ-ID, des masques générés par des techniques de machine learning à partir de nos catalogues de galaxies, indiquant la probabilité d'observer une galaxie dans chaque position du ciel observé (= masques de visibilité).



(Crédit : Odier & Achbak 2022, LPSC).

Quelques masques photométriques générés par VMPZ-ID (du haut vers le bas, de la droite vers la gauche) : qualité des pixels, limite de magnitude observable, bruit (RMS), absorption par les poussières, empreinte (avec pixels problématiques), empreinte (sans pixel problématiques), fonction d'étalement du point, probabilité d'observer une galaxie (= masques de visibilité).

SERVICE PATRIMOINE ET INFRASTRUCTURES

Membres permanents

Thierry Cabanel, Nicolas Rico, Christophe Bernard (chef de service).

Le service assure une mission d'intérêt général concourant à la bonne marche du laboratoire. Garant du bon fonctionnement des infrastructures, le service accompagne le développement des activités scientifiques. Il est en charge des aménagements, de la mise à niveau et de la rénovation des différents locaux du laboratoire, voire de la création de nouveaux espaces d'expériences.

Missions et organisation

Le Service patrimoine et infrastructures a la lourde tâche de la gestion des bâtiments et des équipements techniques associés. Il assure la maîtrise d'œuvre des travaux lorsqu'elle est nécessaire. Il a une mission transversale au sein du laboratoire. Il doit en effet réaliser les études et organiser les travaux d'aménagement et de modification des locaux en vue de les adapter aux nouvelles exigences des différents services et expériences. De manière récurrente, il doit aussi assurer la maintenance du patrimoine bâti et des installations techniques qui lui sont associées. Il élabore les programmes de rénovation et de mise aux normes de locaux parfois planifiés sur plusieurs années.

Le service est constitué de 3 personnes pour entretenir un site composé de 10 bâtiments construits fin des années 60 représentant environ 20 000 m² de bureaux et d'aires d'expérience sur 5 hectares d'emprise au sol. Les infrastructures vieillissantes 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, 18 climatisations ou ventilo convecteurs, 3 chaudières gaz de 1800 kW, 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

Nous procédons à des travaux d'aménagement des salles techniques destinées aux projets du laboratoire. En 2019, une nouvelle salle de préparation et une salle de collage ont été créées au premier étage du Hall B pour l'expérience Atlas. Ces salles ont

été équipées de climatisations réversibles, d'une sorbonne et d'une armoire ventilée. Pour l'expérience GENEPI, un pupitre de contrôle a été créé et le sous-sol du bâtiment 8 a été sécurisé avec des grilles. En 2021, des travaux d'infrastructures ont été réalisés pour l'accueil de la nouvelle salle de cosmologie expérimentale (dite salle millimétrique) dans le Hall B. Nous avons également sécurisé la salle TP neutron au 2^e étage du bâtiment 1.



Photo 1. (Crédit C. Bernard, LPSC). - Rénovation et isolation du toit du bâtiment 7.

Le service effectue régulièrement des travaux de nature à limiter les dépenses énergétiques et l'empreinte écologique du laboratoire. En 2019, le toit du bâtiment 7 a été refait et une isolation a été ajoutée (voir photo 1). Nous avons poursuivi la campagne de changement des fenêtres des bâtiments 1 et 7 et nous avons changé la régulation de la chaufferie. En 2021, un espace de tri sélectif a été créé et trois châssis vitrés ont été remplacés au bâtiment 9 (voir photo 2). Nous remplaçons progressivement les anciens éclairages par des luminaires LED (dans le hall des sources d'ions en 2019 et à l'atelier mécanique en 2021).

Chaque année, nous rénovons plusieurs espaces communs, bureaux et salles techniques du laboratoire. Ainsi, en 2019, nous avons rénové le hall d'entrée, la conciergerie, 8 bureaux, la salle occupée par le service comptabilité, la salle électronique et la salle de nettoyage du Hall B. En 2020, les travaux ont concernés 8 bureaux et les salles occupées par les services électronique et mécanique. En 2021, 10 bureaux ont été rénovés.



Photo 2. (Crédit C. Bernard, LPSC). - Nouveaux châssis vitrés au bâtiment 9.

Le rafraîchissement des peintures dans les espaces communs est programmé sur plusieurs années : les couloirs du 3^e étage ont été effectué en 2019, et ceux des 1^{er} et 2^e étages en 2021.

Nous veillons à la sécurité et améliorons les accès au laboratoire. En 2020, l'ensemble des clôtures et grilles du laboratoire ont été réparés. Nous avons aussi procédé au nettoyage complet du sous-sol du bâtiment 1 et avons posé grille et portillon pour en limiter les accès. En 2021, les portes d'accès des camions du bâtiment 2 et du Hall B ont été remplacées par des portes sectionnelles motorisées.

Nous entretenons régulièrement le réseau d'eau industrielle. Nous avons créé des réseaux d'eau industrielle de secours pour le bâtiment 1 en 2020 et pour le Bâtiment 8 en 2021. Nous avons aussi réalisé des travaux d'aménagement de trois salles pour le déménagement de la boucle en eau au B7.

Les infrastructures de ventilation et de climatisation sont régulièrement renouvelées et améliorées. En 2020, l'échangeur de refroidissement des salles serveurs a été remplacé. Nous avons installé de nouveaux compresseurs dont un avec un moteur à vitesse variable et un sécheur d'air (voir photo 3). Au bâtiment 7, une sorbonne plus moderne a remplacé deux anciennes et deux armoires ventilées ont été installées, ce qui a

nécessité la pose d'une ventilation en toiture. En 2021, la ventilation des bacs acide à l'atelier mécanique a été remplacée.

Pour améliorer la vie au laboratoire durant l'été notamment, des fontaines à eaux ont été installées dans les espaces communs et la grande salle du conseil au 1^{er} étage du bâtiment 1 a été climatisée.

Comme autres améliorations notables, nous pouvons citer la mise en place d'un réseau téléphonique DECT au bâtiment 9 en 2019 et le remplacement du chariot élévateur par un Fenwick 2.5T.

Photo 3. (Crédit C. Bernard, LPSC).

Local technique avec les nouveaux compresseurs et le sécheur d'air.



SERVICE SÉCURITÉ ET RADIOPROTECTION

Membres permanents

William Regairaz,
Assistant de Prévention (AP), Personne Compétente en Radioprotection (PCR) du laboratoire,
et gestionnaire des matières nucléaires.

Ce service a pour vocation première de préserver la santé des agents et du public.

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 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. Ces 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.

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.



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2 0 1 9 - 2 0 2 1

COMITÉ ÉDITORIAL

Audrey COLAS
Rachel DELORME
Laurent DEROME (directeur de la publication)
Killian MARTINEAU
Johana PAQUIEN
Laurence PEROTTO (coordinatrice)
Solenne REY

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

Design & réalisation : Philippe Tur - <https://philippetur.fr>
Imprimé en novembre 2022 par PixartPrinting - <https://www.pixartprinting.fr>

Imprimé sur papier certifié FSC®.



La certification FSC® garantit que ce journal est imprimé sur des matériaux provenant de forêts gérées selon des normes standards environnementales, sociales et économiques très strictes.



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

