

CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES
DE BORDEAUX GRADIGNAN

RAPPORT D'ACTIVITÉ



RAPPORT D'ACTIVITÉ

2015-2019

SOMMAIRE

RECHERCHE

9	Astroparticules
17	Aval du Cycle et Énergie Nucléaire ACEN
27	Excitations Nucléaires par Laser ENL
39	Imagerie Chimique et Spéciation ICS
45	Interactions Rayonnements Ionisants et Biologie IRIBIO
53	Neutrino et Basses Radioactivités NEUTRINO
67	Noyaux Exotiques NEX
87	Radioactivité et Environnement RADEN
97	Physique Théorique
107	Publications dans les revues à comité de lecture
117	Communications écrites dans des conférences avec actes
123	Communications orales, conférences, workshops et séminaires

COMPÉTENCES ET RÉALISATIONS TECHNIQUES

141	Service Administration-Campus
149	Service Électronique et Acquisition
157	Service Informatique
163	Service Instrumentation et Détecteurs
171	Service Mécanique
179	Service Radioprotection
183	Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine AIFIRA
189	Plateforme Régionale Interdisciplinaire de Spectrométrie Nucléaire en Aquitaine PRISNA
195	Plateforme Interdisciplinaire d'Analyse des Gaz Rares en Aquitaine PIAGARA
201	ARCANE - PRISNA Prestations
205	Laboratoire commun P2R

ENSEIGNEMENT-FORMATION À ET PAR LA RECHERCHE

208	Enseignement et Formation
210	Thèses HDR
212	Stages

VIE ET FONCTIONNEMENT DU LABORATOIRE

218	Organisation et ressources du laboratoire
222	Hygiène et sécurité
224	Communication
232	Formation Permanente
234	Cellule de valorisation & transfert de technologie
236	Séminaires
242	Effectifs du CENBG
243	Visiteurs

AVANT-PROPOS

En tout premier lieu, je tiens à saluer et à remercier Philippe Moretto, directeur du laboratoire jusqu'en janvier 2018 et son directeur adjoint Stéphane Grévy ainsi que Bertram Blank, directeur par intérim jusqu'en septembre 2018, pour tout le travail accompli pendant la majeure partie de la période 2015 – 2019 que couvre ce rapport d'activité. Le laboratoire et ses activités de recherche sont soutenus par ses tutelles : l'Université de Bordeaux et le CNRS/IN2P3 (et le CNRS/INC en tutelle secondaire).

Ces années 2015-2019 ont été très fructueuses sur le plan des résultats scientifiques et des développements techniques pour le laboratoire comme le montre la lecture de ce rapport. Son investissement a été également remarquable en termes d'enseignement, de formation et de valorisation. La communication vers le grand public demeure une constante du Laboratoire, elle a connu un point culminant sur la période couverte par ce rapport d'activité, lors de la célébration du 50ème anniversaire du CENBG, événement partagé avec les tutelles, la Région Nouvelle Aquitaine, les partenaires, les scolaires et le grand public.

La compréhension de l'infiniment petit, son lien avec l'infiniment grand et l'utilisation des techniques issues de la physique nucléaire pour des recherches en santé et environnement constituent le socle des activités de recherche du Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux-Gradignan. La richesse du Laboratoire est dans la qualité et la diversité de ses activités scientifiques reconnues internationalement, la compétence et l'expertise de ses services techniques. Les équipes réalisent en partie leurs expériences dans le cadre de projets et de grandes collaborations, auprès d'équipements nationaux et internationaux (GANIL, CTA, HESS, GSI, LSM, FERMI, RIKEN, ESRF, SOLEIL, LULLI, APOLON, ...) et auprès des trois plates-formes du laboratoire (AIFIRA, PRISNA, PIAGARA). Le laboratoire collabore en lien étroit avec les autres laboratoires du site bordelais sur des priorités scientifiques de l'Université de Bordeaux. Le CENBG bénéficie également du soutien de la Région Nouvelle Aquitaine dans ses activités de recherche et ses partenariats avec des laboratoires du site ou des sociétés locales ou régionales.

En introduction à ce rapport, voici une présentation synthétique des travaux et de certains résultats obtenus par les équipes qui sont regroupées par pôles thématiques.

Le **pôle « Astro-Neutrino »** s'intéresse à la compréhension des mécanismes d'accélération du rayonnement cosmique créé dans des phénomènes astrophysiques et à l'étude des propriétés du neutrino, particule élémentaire qui a un rôle majeur en astrophysique et cosmologie. Dans ce pôle l'équipe « Astroparticule » étudie les rayonnements gamma de haute énergie en participant aux expériences internationales FERMI (Satellite), HESS (Namibie) et CTA (Espagne). Elle a contribué à la découverte de nombreux objets astrophysiques, sources de ces rayonnements. Leurs études ont permis de progresser sur la compréhension des mécanismes d'accélération des rayonnements cosmiques qui bombardent la Terre. L'avenir dans cette discipline est le projet CTA dans lequel l'équipe s'est engagée avec notamment des contributions techniques dans les futures cameras de détection des rayonnements gamma.

L'équipe « Neutrino », qui est l'autre composante de ce pôle, participe à plusieurs expériences NEMO3, SuperNEMO, Double Chooz et JUNO pour mesurer les propriétés du neutrino, notamment sa nature et sa masse ainsi que les paramètres liés à leurs oscillations entre les 3 familles de neutrinos. Elle a activement contribué à l'expérience NEMO3 qui a obtenu un nombre important de résultats pour la mesure de la nature et de la masse du neutrino. L'équipe a également participé à la mesure des paramètres des oscillations des neutrinos venant des réacteurs nucléaires (Double Chooz). Elle est actuellement impliquée dans deux expériences internationales (SuperNEMO, JUNO) pour tenter notamment de mesurer la valeur de la masse du neutrino et déterminer sa nature (le neutrino est-il sa propre anti-particule ?)

Le **pôle « Nucléaire »** étudie, avec des approches expérimentales et théoriques, la structure du noyau atomique et les forces fondamentales. L'objectif étant de mieux comprendre les propriétés de la matière, la formation des éléments dans l'univers. Il est composé de quatre équipes : L'équipe « **Noyaux Exotiques** » s'intéresse aux modes de décroissance de noyaux atomiques, dits exotiques, n'existant brièvement que dans les étoiles et les phénomènes astrophysiques violents ou bien créés auprès d'accélérateurs (GANIL, ISOLDE-CERN, JYVASKYLÄ, RIKEN). Au travers de diverses expériences, elle a mis en évidence l'existence de nouveaux isotopes dont elle a étudié les modes de désintégration permettant ainsi de mieux comprendre la structure nucléaire. L'équipe a aussi pour objectif d'étudier une des quatre forces de la nature, l'interaction faible, par une approche originale. Elle a proposé et effectué une expérience (WISArD) au CERN qui a montré le potentiel de cette approche pour contraindre les modèles théoriques décrivant l'interaction faible.

L'accélération d'ions dans un plasma créé par laser et l'étude des propriétés des noyaux atomiques dans des milieux extrêmes est au centre des activités de l'équipe « **Excitations Nucléaires par Laser** ». Elle a développé une source pulsée d'électrons extraits d'un plasma qui pourrait être utilisée pour des applications nécessitant de fortes irradiations. L'équipe a montré également la possibilité d'accélérer des protons à partir d'un jet de gaz intense, première étape pour le développement d'un accélérateur laser-plasma d'ions.

L'équipe « **Aval du Cycle et Énergie Nucléaire** » étudie les processus de fission des noyaux atomiques lourds dans le cadre du cycle du combustible des réacteurs nucléaires et la production des éléments lourds dans des phénomènes astrophysiques. Elle a développé une méthode novatrice dite de « substitution » pour mesurer les sections efficaces de noyaux à courte durée de vie ou très radioactifs. Ses travaux ont conduit au projet NECTAR qui a été accepté comme « Advanced European Research Council grant », pour le développement d'un dispositif expérimental qui permettra l'étude d'un grand nombre de noyaux atomiques produits en utilisant la méthode de substitution par cinématique inverse dans

les anneaux de stockage d'ions lourds. L'équipe étudie les propriétés de la fission avec des travaux originaux sur les produits de fission du ^{180}Hg . Elle a contribué fortement au développement du code GEF pour une description générale des observables de la fission.

L'équipe « **Physique Théorique** » étudie la nature de l'interaction effective entre les nucléons du noyau atomique et son impact sur la structure des noyaux atomiques en lien avec les expérimentateurs du laboratoire. Elle développe des modèles pour décrire la structure nucléaire et prédire les propriétés des noyaux atomiques. Elle est impliquée dans l'étude théorique de la fission des noyaux lourds. Un travail original est en cours également sur une possible unification des forces gravitationnelles de Newton et électrostatiques de Coulomb.

L'impact de la radioactivité et des métaux sur le vivant ainsi que la détection des gaz rares sont au cœur des activités du pôle « **Santé-Environnement** » constitué de 3 équipes.

L'équipe **RADEN** est spécialisée dans la détection des gaz rares, elle a développé pour cela la plateforme PIAGARA et a obtenu des résultats importants dans les mesures de diffusion de l'hélium dans les matériaux utilisés dans l'industrie nucléaire, dans des mesures de paléotempératures dans les eaux anciennes pour mieux comprendre l'histoire du climat et sur la compréhension des mécanismes de piégeage du xénon dans la croûte terrestre. Cette équipe étudie également les populations bactériennes dans des environnements radiatifs naturels (anciennes mines d'uranium) et leur impact sur la microfaune notamment dans le cadre de la Zone-Atelier Territoires Uranifères.

Les activités de l'équipe « **Interactions Rayonnements Ionisants et Biologie** » portent sur l'interaction du rayonnement ionisant sur le vivant pour étudier les réponses biologiques radio-induites lors d'exposition à une dose contrôlée, expérimentalement et par simulation et pour comprendre les mécanismes de régulation de l'homéostasie du vivant. Cette équipe utilise les faisceaux d'ions de la plateforme AIFIRA pour ses activités. Elle a obtenu des résultats de premier plan dans l'étude des mécanismes d'interaction entre les cellules et des nanoparticules métalliques pour le développement de thérapies contre le cancer. Il a également développé la tomographie par technique d'imagerie protonique 3D sur des organismes multi-cellulaires. Une activité importante de l'équipe concerne également les simulations Monte-carlo des dommages biologiques au niveau de l'ADN liés aux radiations avec une forte participation au développement du code GEANT4-DNA qui devient un outil de référence international dans ce domaine.

Les activités de l'équipe « **Imagerie Chimique et Spéciation** » se focalisent sur les effets neurologiques ou neurotoxiques des éléments chimiques stables ou radioactifs. Elle a notamment mis en évidence l'implication du cuivre et du manganèse dans certaines maladies neurodégénératives et du rôle du fer dans la maladie de Parkinson.

Les recherches menées au CENBG s'appuient sur des réalisations techniques innovantes conçues et produites par les différents services techniques du Laboratoire (mécanique, électronique, instrumentation et informatique) avec le soutien du service administratif. Ils permettent d'apporter des contributions majeures dans les programmes de recherche ambitieux auxquels le CENBG participe au niveau local, national et international.

L'enseignement et la formation sont aussi au cœur des activités du Laboratoire avec bien évidemment la très grande implication des enseignants-chercheurs dans des responsabilités importantes dans les parcours pédagogiques mais aussi des chercheurs et des IT à divers niveaux de formation. Le Laboratoire accueille également de nombreux étudiants et stagiaires dans les équipes et services pour des formations qui vont de l'apprentissage au doctorat.

La valorisation est aussi une activité importante au laboratoire à travers les cellules de valorisation Arcane et Prisna-Prestations associées aux plateformes AIFIRA et PRISNA ainsi qu'avec un laboratoire commun « Physique des Particules pour la Radioprotection » (P2R) qui a été créé avec la société Carmelec et qui a bénéficié d'un financement ANR.

Le personnel est aussi très impliqué dans les actions de communications pour faire découvrir nos activités, réalisations et résultats à nos tutelles, partenaires et grand public.

Avec l'arrivée en 2022 d'un nouveau bâtiment ressources, CREATIF, qui accueillera de nouvelles salles d'expériences et de formation, le Laboratoire aura un outil moderne lui permettant de continuer à développer ses activités de recherche et d'enseignement et faire face aux défis scientifiques et techniques du futur.

Je remercie l'ensemble du personnel du CENBG pour toutes leurs contributions et implications dans les travaux du laboratoire qui sont décrits dans ce document. Cet ouvrage collectif a été coordonné par Bertram Blank avec l'aide de Michel Pravikof et Asuncion Carmona. Un grand merci à eux. Je tiens aussi à remercier particulièrement Fanny Cadou pour la réalisation et la mise en page de ce rapport d'activité.



Fabrice Piquemal
Directeur du CENBG

RECHERCHE

SYNTHÈSES DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

9	Astroparticules
17	Aval du Cycle et Énergie Nucléaire ACEN
27	Excitations Nucléaires par Laser ENL
39	Imagerie Chimique et Spéciation ICS
45	Interactions Rayonnements Ionisants et Biologie IRIBIO
53	Neutrino et Basses Radioactivités NEUTRINO
67	Noyaux Exotiques NEX
87	Radioactivité et Environnement RADEN
97	Physique Théorique

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS PAR ANNÉES

107	Publications dans les revues à comité de lecture
117	Communications écrites dans des conférences avec actes
123	Communications orales, conférences, workshops et séminaires

ASTROPARTICULES



Vue du satellite Fermi
dans la coiffe
de la fusée
avant son lancement
en Juin 2008. ©nasa

ABSTRACT

We are tracking down the origin of high-energy cosmic rays by studying their gamma-ray emission. Interstellar and intergalactic magnetic fields do not deflect electrically neutral gammas - they come straight from their cosmic accelerators, whereas charged cosmic rays reaching Earth come from a tangled mix of different objects. We model the acceleration and emission mechanisms and then compare observed with predicted spectra.

Our GeV gamma-ray data comes from the Large Area Telescope (LAT) on the Fermi satellite, and our TeV gamma-ray data comes from the HESS Cherenkov imager array in Namibia.

We are pursuing three research topics. Active Galactic Nuclei (AGNs) dominate the high-energy sky beyond the Milky Way. Pulsars on the one hand, with the pulsar wind nebulae (PWNs) and supernova remnants (SNRs) that often surround them on the other hand, are the largest source classes within our Galaxy. Radio, optical, and X-ray data complement the gamma-ray observations.

We study individual objects in detail, but also compile source catalogs to reach general conclusions. We are preparing HESS' successor, the Cherenkov Telescope Array (CTA), which will cover the 20 GeV to 300 TeV range, with responsibilities for analysis tools, and for a mechanical component of the mid-sized telescopes.

RÉSUMÉ

Nous nous intéressons à l'origine du rayonnement cosmique par l'étude des accélérateurs cosmiques d'électrons et de protons. Nous observons pour cela le rayonnement gamma produit par ces particules accélérées et nous remontons aux caractéristiques des sources en modélisant les mécanismes d'accélération mis en jeu.

Les données expérimentales à haute énergie (GeV) proviennent du Large Area Telescope (LAT) embarqué sur le satellite Fermi, tandis que les photons à très haute énergie (TeV) sont détectés par le réseau de télescopes Tcherenkov H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System). L'étude des rayons gamma est complétée par des mesures en radio, en optique, et en rayons X.

Nous poursuivons des activités sur 3 axes : hors de la Voie Lactée, les noyaux actifs de galaxies (AGN) dominent le ciel gamma. Dans la Galaxie, les pulsars d'un côté, les nébuleuses à vent de pulsar (PWN) et les vestiges de supernova (SNR, accompagnant souvent les pulsars) d'un autre sont les accélérateurs les plus communs.

Notre groupe est très impliqué dans la réalisation des catalogues de sources et des études de populations mais se concentre aussi sur certaines sources plus particulières. Successeur de H.E.S.S., le projet CTA (Cherenkov Telescope Array) couvrira le domaine en énergie de 20 GeV à 300 TeV et sera pour la décennie à venir l'outil phare de l'astronomie gamma. Nous sommes impliqués dans CTA au niveau des outils d'analyse ainsi que du développement d'une composante mécanique de la caméra des télescopes de taille moyenne.

PERMANENTS

Denis DUMORA
Marie-Hélène GRONDIN
Marianne LEMOINE-GOUMARD
Benoît LOTT
Thierry REPOSEUR
David SMITH

POST-DOCTORANTS

Justine DEVIN

DOCTORANTS

Arnaud-Rémy MARÈS



COLLABORATIONS

Fermi-LAT, (Large Area Telescope), télescope spatial sensible aux rayons gamma.

H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System), télescope Tcherenkov pour la détection des rayons gamma.

CTA (Cherenkov Telescope Array), télescope Tcherenkov pour la détection des rayons gamma. Successeur de H.E.S.S.

INTRODUCTION

L'astronomie gamma est un domaine récent dans notre histoire et a permis d'ouvrir une fenêtre complémentaire aux autres longueurs d'onde sur l'Univers. Au-delà de quelques dizaines de MeV les phénomènes physiques mis en jeu ne peuvent plus être d'origine thermique ni liés aux propriétés des noyaux atomiques. A ce jour la limite en énergie des rayons gamma détectés ne semble définie que par la sensibilité des détecteurs : des photons de plusieurs dizaines de TeV sont couramment observés, qui ne peuvent être

produits que par l'interaction de particules d'énergie bien supérieure. C'est donc tout naturellement que l'observation de ces photons doit nous conduire à l'origine du rayonnement cosmique. L'absence de charge électrique des photons exclut toute possibilité de déviation par les champs magnétiques galactiques et extragalactiques, de sorte que la mesure de la direction d'arrivée nous permet de localiser précisément la source du rayonnement.

Les années 2000 ont vu la construction et l'exploitation de deux instruments dont les caractéristiques et les performances ont permis un réel bond quantitatif de leur sensibilité. Ces deux instruments sont le Large Area Telescope (LAT) du satellite Fermi, mis sur orbite par la NASA en juin 2008, et le réseau de télescopes Tcherenkov au sol H.E.S.S. inauguré en septembre 2004 et complété en juillet 2012. Le Fermi-LAT couvre une gamme en énergie allant de 30 MeV à plus de 300 GeV en observant tout le ciel continûment, tandis que H.E.S.S. est sensible au-delà de quelques dizaines de GeV avec un champ de vue plus réduit (5°). Certaines sources cosmiques ont un spectre d'émission suffisamment étendu pour être détectées par les deux instruments ce qui nous permet leur étude sur près de 7 ordres de grandeur en énergie.

La **figure 1** montre en coordonnées galactiques le ciel observé en rayons gamma d'énergie supérieure à 1 GeV et pendant 11 ans par le Fermi-LAT. L'intensité lumineuse reconstruite est croissante du bleu au blanc et représente le nombre de photons détectés. La bande centrale est la Voie Lactée où l'on distingue une composante diffuse sur laquelle se superposent des points bien définis. La partie diffuse correspond aux rayons gamma issus de la désintégration de mésons neutres produits dans les interactions des rayons cosmiques (principalement des protons) de hautes énergies avec le milieu interstellaire. Les points lumineux correspondent à des sources galactiques ponctuelles ou spatialement bien définies : ce sont les pulsars, les nébuleuses à vent de pulsars (PWNe) et les restes de supernovæ (SNRs). En dehors du plan galactique se trouve le reste de l'Univers émetteur gamma : il est constitué en très grande majorité de noyaux actifs de galaxie (AGNs) dont les "blazars" qui émettent aux énergies les plus élevées.

La **figure 2** montre la répartition des sources détectées par le Fermi-LAT au-dessus de 50 MeV après 8 ans de données (catalogue "4FGL"). La représentation est la même que pour la **figure 1** et démontre les capacités de localisation de l'instrument. Ce catalogue contient 5065 sources dont plus de 3200 AGNs, 239 pulsars et près de 60 SNRs-PWNe. A titre de comparaison le précédent instrument dans cette gamme en énergie, EGRET sur le satellite CGRO, comptait 271 sources après 9 ans de service. On voit ainsi aisément le formidable bond en avant que constitue l'avènement de Fermi. Une comparaison similaire entre H.E.S.S. et ses prédécesseurs WHIPPLE et CAT montrerait un progrès comparable à très haute énergie, au-delà de 100 GeV.

Les noyaux actifs de galaxie, les pulsars, les restes de supernovæ et nébuleuses à vent de pulsars constituent les 3 axes d'étude du groupe. Si les AGNs et les sources galactiques se distinguent par leurs dimensions, ils se ressemblent par les processus physiques qu'ils abritent. L'analyse de leurs données requiert des techniques très semblables de sorte que bien qu'il y ait une séparation marquée en ce qui concerne les objets d'étude, la différence est moins nette quant aux finalités et aux moyens.

Notre motivation est de caractériser toute une population d'une classe donnée, de comprendre les mécanismes qui conduisent à l'évolution de ces systèmes. En particulier nous voulons quantifier leur contribution au rayonnement gamma dans l'Univers, ou, par exemple, à la production et à l'accélération des rayons cosmiques qui les produisent. Le paradigme actuel est que ceux-ci sont produits dans des sources galactiques (par exemple les SNRs/PWNe) au-dessous du "genou" (10^{15} eV), et d'origine extragalactique au-delà. La difficulté est que le rayonnement cosmique observé est majoritairement constitué de protons alors que les SNRs et PWNe semblent accélérer préférentiellement des électrons, si l'on en croit nos modélisations. Tirer des généralités de quelques cas (particuliers donc) est difficile et c'est pourquoi les études de population sont primordiales. La confiance dans ces études passe bien sûr par la maîtrise des techniques d'analyse, de plus certaines sources "sortent de la classe" et méritent des attentions plus approfondies. C'est pourquoi si les catalogues de sources sont nos publications phares, nous étudions aussi des sources particulières. Pour certaines d'entre elles, nous disposons d'observations à d'autres longueurs d'onde (radio, optique, rayons X) qui permettent de contraindre certains paramètres de nos modèles.

Fermi restera en opération au moins jusqu'en 2022 inclus. Une revue de la NASA aura alors lieu pour décider des 3 années suivantes. En tout état de cause nos activités sur Fermi resteront importantes dans les années qui viennent, ceci d'autant plus qu'aucun successeur ne se profile à l'horizon.

Aux très hautes énergies uniquement accessibles par les télescopes au sol le futur de la discipline s'appelle CTA. Son seuil de détection se situera à 20 GeV avec une sensibilité satisfaisante jusqu'à 300 TeV. Il s'agira d'un réseau de télescopes dont le déploiement est prévu à partir de 2021 jusqu'en 2025. Deux sites sont prévus : sur l'île de La Palma aux Canaries pour le nord, et près de Paranal au Chili pour le sud. La mise en service des premiers télescopes s'échelonnara dans le temps et dès que leurs performances seront supérieures à celle de H.E.S.S., il est prévu que nous cessions nos activités sur H.E.S.S..

ANALYSE DE DONNÉES

ÉTUDES DE POPULATIONS

MODÉLISATION

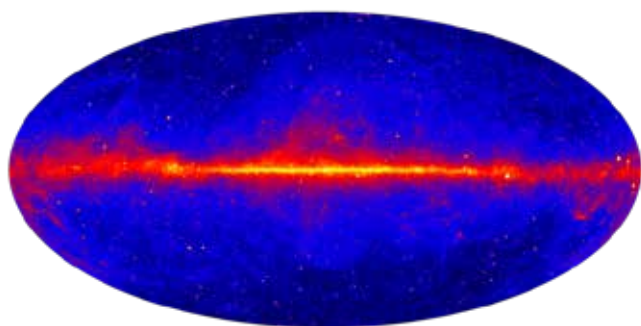


FIGURE 1

Le ciel "gamma" au-dessus de 1 GeV vu par le Fermi-LAT (11 ans de données).

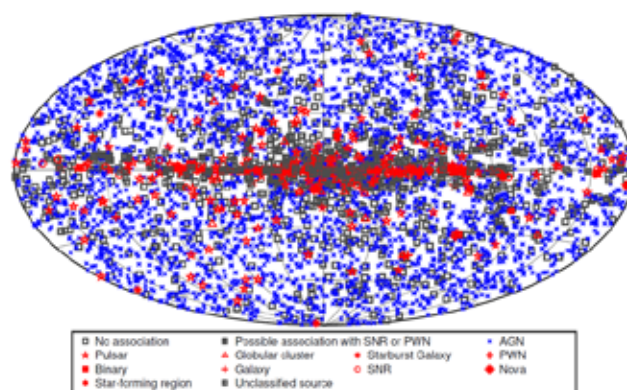


FIGURE 2

Répartition des 5065 sources du catalogue Fermi détectées avec 8 ans de données au-delà de 50 MeV [LAT19].

1

CATALOGUES DE SOURCES DÉTECTÉES PAR LE FERMI-LAT (3FHL ET 4FGL)

Deux catalogues généraux de sources (3FHL et 4FGL) ont été produits durant la période considérée par la collaboration du Fermi-LAT. Ces catalogues représentent des ressources importantes pour la communauté, que ce soit en tant que référence pour les analyses de sources individuelles, pour servir de base à des travaux sur les populations de sources de différentes classes ou pour susciter des observations visant à déterminer la nature des sources non associées. Pour ces deux catalogues, la tâche d'association des sources détectées en rayons gamma avec des contreparties provenant de catalogues établis dans d'autres longueurs d'onde était placée sous la responsabilité de Benoît Lott. Ce dernier était également coordinateur du groupe de travail sur les catalogues de la collaboration Fermi-LAT entre 2015 et 2019. Une méthode dite Bayésienne, initialement développée à l'IRAP de Toulouse par Jürgen Knödelseder et similaire à celle conçue pour la mission EGRET a été utilisée en l'améliorant. La calibration de la méthode, visant à déterminer la probabilité d'association "à priori", est réalisée en faisant correspondre le nombre d'associations fortuites dérivé des probabilités d'association avec celui estimé par simulations Monte-Carlo, en décalant la position des sources détectées de quelques degrés. Le pipeline d'association a été transféré au SLAC et le schéma de calibration a été modifié afin de l'accélérer considérablement. Une version très allégée de la procédure de calibration qui permet d'estimer la valeur de la probabilité "à priori" en quelques minutes a été développée.

Le catalogue 3FHL [AJEL17] inclut 1556 sources détectées à $E > 10$ GeV avec 8 ans de données du LAT. Ce nombre de sources excède le nombre de photons détectés dans ce domaine d'énergie par EGRET. Cette liste de sources à haute énergie constituera une référence précieuse pour guider les observations futures de CTA. Les blazars, qui sont des radiogalaxies dont la direction du jet émanant de l'environnement du trou noir supermassif de la galaxie est proche de la ligne de visée, constituent près de 80% de ces AGNs. Environ 750 blazars (60% du total) sont de la classe HSPs ("high-synchrotron peaked sources", dont le maximum du pic synchrotron de la distribution d'énergie est situé dans le domaine des rayons X), à comparer aux 14 sources de cette classe détectées antérieurement par EGRET.

Le catalogue 4FGL [LAT19] de sources détectées au-dessus de 100 MeV, également basé sur 8 ans de données, est plus général et plus riche que le 3FHL en incluant des informations spectrales et temporelles (courbes de lumière à 2 mois et 1 an) plus détaillées. Établir un catalogue à basse énergie est beaucoup plus compliqué qu'à haute énergie. En effet, d'une part, la fonction d'étalement du point croît rapidement quand l'énergie diminue à cause de la diffusion multiple des paires électrons-positons dans le trajectographe du LAT, ce qui entraîne des problèmes de confusion des sources. D'autre part, la fiabilité du modèle d'émission diffuse de la Galaxie devient un problème important à basse énergie. La responsabilité de la détection des sources et de leur caractérisation a été assurée par Jean Ballet, du CEA de Saclay. Le catalogue 3FGL [ACKE15b] précédent, établi avec 4 ans de données, comptabilisait 3300 sources détectées avec une significativité supérieure à 4.1 sigma. Le catalogue 4FGL en inclut 5065, dont 70% sont associées à des sources connues à d'autres longueurs d'onde. Le taux d'association varie fortement en fonction de la significativité : alors que toutes les sources brillantes sont associées, seules 40% de celles proches du seuil de détection le sont. Ce taux varie également avec la latitude Galactique : il est de 85% à haute latitude et tombe à 40% dans la région du plan Galactique. La classe des noyaux actifs de galaxie (AGNs) est de loin majoritaire, avec plus de 3100 sources. La seconde classe est celle des pulsars, avec 239 sources. Les autres classes présentes sont des galaxies non-actives (3), les galaxies à flambées de formation d'étoiles (7), les restes de supernova (40), les nébuleuses à vent de pulsars (17), les amas globulaires (30), les binaires X à forte masse (6) et à faible masse (2), les systèmes binaires d'étoiles (1), les novae (1).

Le 4FGL a été publié en Mars 2020, après que plusieurs listes provisoires aient été rendues publiques au préalable pour le bénéfice de la communauté.

Les troisième et quatrième catalogues d'AGNs détectés par le LAT, 3LAC [AJEL15] et 4LAC [LATC19a] ont été produits conjointement aux catalogues généraux de sources 3FGL et 4FGL respectivement. La coordination de ces deux catalogues a été assurée par B. Lott, en collaboration avec des collègues de l'Agence Spatiale Italienne. Ces catalogues font suite aux catalogues LBAS, 1LAC et 2LAC, où l'implication du CENBG a été également très importante, couplés aux catalogues BSL (basé sur 3 mois de données), 1FGL (11 mois de données) et 2FGL (2 ans de données), respectivement. En plus de compiler les AGNs détectés, ces catalogues s'attachent à décrire les propriétés générales (flux, indice spectral, courbure spectrale, luminosité, variabilité, distance, position du pic synchrotron...) des différentes classes et à mieux cerner les mécanismes responsables de ces différences. Le 3LAC compte environ 1600 sources à latitude Galactique supérieure à 10° . Le 4LAC en compte 2850, à comparer avec les 70 AGNs détectés en rayons gamma avant le lancement de Fermi.

Une écrasante majorité (>98%) de ces sources sont des blazars atteignant un décalage spectral maximum de 3.1 pour 3LAC et 4.1 pour 4LAC. Les autres sources sont principalement des radio galaxies proches (15 pour 3LAC, 42 pour 4LAC) dont le jet est orienté à plus grand angle que pour les blazars. Parmi les blazars existent deux classes principales : les "Flat-Spectrum Radio Quasars" (FSRQs, très lumineux, lointains, avec des raies larges d'émission intenses) et les BL Lacs (moins lumineux, plus proches, avec des raies larges faibles ou absentes). Les fractions de FSRQs, BL Lacs et blazars non-classifiées sont de (30%, 40%, 30%) et (24%, 38%, 38%) pour les 3LAC et 4LAC, respectivement. Un travail important, impliquant une vingtaine de personnes, a consisté à déterminer la position du pic synchrotron pour l'ensemble des sources à partir des données d'archives à basse énergie et de classer les sources en fonction de la position de ce pic (LSP, ISP, HSP pour low-, intermediate- et high-synchrotron peaked sources, respectivement). Les propriétés des blazars émettant en rayons gamma mises en lumière dans les catalogues précédents sont confirmées, en particulier une forte dépendance de l'indice spectral en fonction de la classe des sources et de leur luminosité et une plus grande variabilité des FSRQs par rapport aux BL Lacs dans le domaine gamma.

Image composite dans
les domaines micro-
onde, visible et rayons X
de la radiogalaxie
Centaurus A.
©ESO, MPIfR, NASA



Deux papiers donnent un aperçu de nos travaux récents :

- A New, Low Braking Index for the LMC Pulsar B0540-69 ^[MARS16]
- Searching a Thousand Radio Pulsars for Gamma-ray Emission ^[SMIT19]

1- B0540-69 est surnommé "le jumeau du Crabe". Avec un autre pulsar du Grand Nuage de Magellan (LMC) et le Crabe, ce sont les trois pulsars les plus énergétiques connus (les plus grandes puissances de freinage, \dot{E}). Avant le lancement, en 2007, Frank Marshall de la NASA s'est joint à notre campagne de suivi chronométrique des pulsars candidats pour Fermi ^[SMIT08]. Depuis des années il utilisait le satellite RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) pour entretenir un modèle de rotation connecté en phase du pulsar. A la fin de 2011 la mission RXTE a été arrêtée et le suivi a cessé. Nous n'avions à l'époque aucune indication d'un signal gamma en provenance de PSR B0540-69.

En 2014, Pierrick Martin (IRAP, Toulouse) a réussi une analyse spectrale et morphologique du LMC avec les données du LAT, afin d'étudier son émission diffuse ^[ACKE16]. Le pulsar émergeait de son analyse et Lucas Guillemot a mis en évidence les pulsations gamma avec l'éphéméride de rotation de Marshall, et publié un article dans Science ^[ACKE15]. Le LMC est 25 fois plus distant que le Crabe.

David Smith a ensuite obtenu des observations régulières avec le satellite Swift, et F. Marshall a rétabli l'éphéméride de rotation. Dès cela fait, nous avons vu qu'une énorme (36%) augmentation de \dot{E} avait eu lieu juste avant la fin de RXTE et avons publié ce résultat ^[MARS15].

PSR B0540-69 est parmi la douzaine de pulsars pour lesquels une mesure de la deuxième dérivée du ralentissement est possible. Avec d^2P/dt^2 on obtient l'indice de freinage n , déterminé par le mécanisme (ou la combinaison de mécanismes) qui freine la rotation de l'étoile à neutrons, $\tau \sim \nu^n$ (le couple de freinage τ

dépend d'une puissance n de la fréquence de rotation ν). Deux ans de suivi avec Swift ont permis la découverte que l'indice était passé de $n=2,129 \pm 0,012$ à $n=0,03 \pm 0,013$. L'ancienne valeur est typique. La nouvelle valeur est inédite, et demande des explications inhabituelles. Notre conclusion, dans ^[MARS16], est que la vitesse avec laquelle le champ magnétique enfoui dans l'étoile a subitement augmenté d'un facteur 4,6. Nous continuons le suivi de PSR B0540-69 avec NICER afin d'en voir la future évolution.

2- Le LAT a vu 255 pulsars à ce jour, nombre qui croît régulièrement, à comparer avec 10 connus avant le lancement de Fermi. Différentes méthodes permettent d'en découvrir de nouveaux. Celle favorisée au CENBG est d'appliquer des éphémérides de rotation obtenues à partir d'observations radio, approche qui donne accès aux pulsars les plus faibles en gammas. Cette sensibilité augmente le volume d'espace accessible, et donc le nombre de pulsars testés, et agrandit ainsi la variété de pulsars visibles.

L'article ^[SMIT19] présente une méthode de pondération de photons utilisable même quand le pulsar n'est pas détecté en continu, et démontre que le seuil en signification statistique peut être diminué sans pour autant souffrir de fausses détections. Les principaux observatoires radio du monde nous ont fourni 1200 éphémérides de pulsars et nous en avons détecté 16 en gammas pour la première fois (**figure 3**). L'un d'eux a une puissance de freinage \dot{E} 5 fois inférieure à celle qu'on croyait auparavant être le minimum nécessaire pour une émission gamma détectable, ce qui oblige à revoir certains aspects des modèles d'émission, ainsi que les estimations de la contribution des pulsars à l'émission diffuse galactique. Bien connaître cette contribution a redoublé d'importance depuis que de nombreux auteurs affirment que le LAT voit de la matière noire dans la région du centre Galactique (annihilation de paires de neutralinos en gammas). Caractériser la population de pulsars peu émissifs améliore les contraintes de la population non résolue.

Actuellement la préparation du 3ième catalogue de pulsars gamma est en cours, suite logique de ^[ABDO13] (515 citations) dont D. Smith a été un des auteurs correspondants. En parallèle avec cette tâche, nous continuons à chercher de nouveaux pulsars émetteurs gamma, et nous menons une étude de la polarisation radio de ces pulsars.

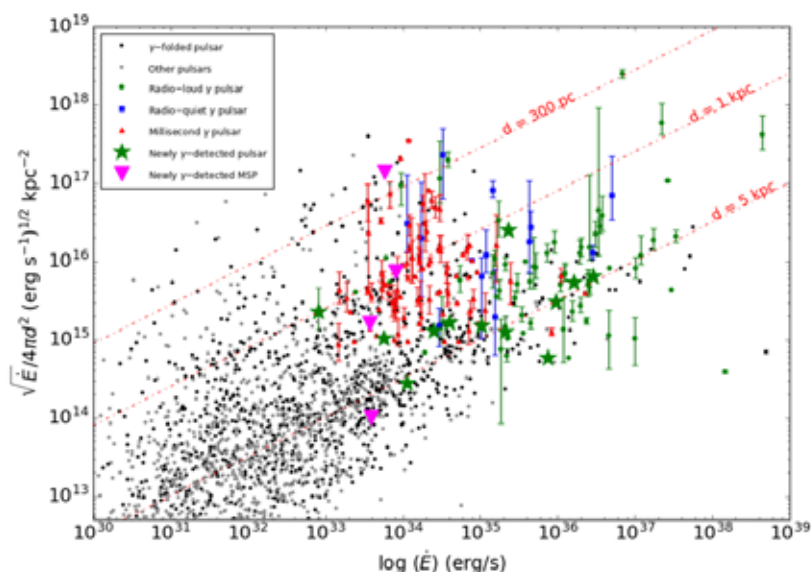


FIGURE 3

Représentation de >2500 pulsars connus.

En ordonné, un estimateur du flux gamma potentiel. En abscisse, la puissance de freinage. Les points noirs et en couleurs sont ~1200 pulsars pour lesquels nous avons une éphéméride de rotation. Pour les points noirs, une pulsation gamma n'est pas détectée. Les grands symboles indiquent les 16 détections publiées dans ^[SMIT16]. Les lignes diagonales correspondent aux distances des pulsars.

Durant les années qui ont suivi le lancement du satellite Fermi, M.-H. Grondin et M. Lemoine-Goumard ont mené l'analyse, la détection et l'identification de six célèbres nébuleuses de pulsars : la nébuleuse du Crabe, Vela-X, MSH 15-52, HESS J1825-137, HESS J1356-645, HESS J1857+026 ainsi qu'un catalogue analysant 54 candidats nébuleuses de pulsars. Ces études se sont enrichies de modélisations théoriques développées en collaboration avec Joseph Gelfand (professeur à New York University Abu Dhabi) et Diego Torres (professeur à l'ICE, Barcelone). La détection de la nébuleuse de pulsar 3C58 a été publiée dans *The Astrophysical Journal* ^[118] et un article sur la nébuleuse MSH 15-52 est actuellement en cours de rédaction par T. Reposeur et M.-H. Grondin.

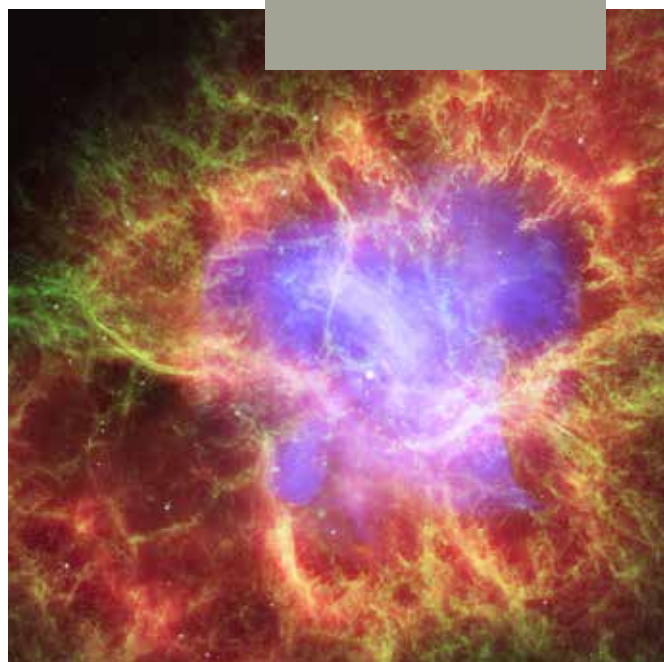
En parallèle et grâce au soutien financier d'une bourse ERC, M. Lemoine-Goumard a fait évoluer ses activités vers les vestiges de supernovæ et les sources non identifiées. Les projets qui ont été conduits s'articulent suivant trois axes principaux : l'étude de l'accélération des rayons cosmiques par les ondes de choc dans les SNRs jeunes, l'étude des SNRs évolués et la recherche de bons candidats SNRs au sein des sources non identifiées.

Dans le cadre du premier axe, quatre articles ont été publiés dans *The Astrophysical Journal* et *Astronomy & Astrophysics* annonçant la détection avec Fermi de quatre vestiges de supernovæ en coquille vus au TeV avec H.E.S.S. (RX J1713.7-3946, RCW 86, SN 1006 et HESS J1731), et démontrant que l'environnement dans lequel le

vestige de supernova évolue est un ingrédient clé. On le voit tout particulièrement dans le cas de SN 1006, analysé durant la thèse de B. Condon (2014 – 2017), pour lequel l'analyse comparative Est-Ouest de SN 1006 semble montrer un spectre plus "mou" dans la partie Ouest où se situe un nuage atomique. Il est fort probable que, dans les régions de forte densité au sein d'un vestige de supernova, l'interaction proton-proton contribue significativement au signal gamma. Cette interaction n'est évidemment pas visible dans les zones moins denses dans laquelle se propage l'onde de choc. Pour que les protons, accélérés par les ondes de chocs des SNRs, émettent un signal significatif par interaction proton-proton, il faut donc un milieu assez dense. C'est le cas pour de nombreux SNRs évolués détectés en radio et qui sont actuellement en interaction avec des nuages moléculaires (deuxième axe des études sur les SNRs). François Brun (post-doctorant au CENBG de février 2016 à septembre 2018) et M. Lemoine-Goumard ont analysé, conjointement avec Fermi et HESS, le jeune vestige W49B situé dans un milieu très dense. L'analyse montre une cassure spectrale significative à basse énergie (**figure 4**) similaire à celle de IC 443 (nommée "pion bump") prouvant que des protons sont bien accélérés dans ce vestige. Ce résultat a été publié dans le numéro spécial *Astronomy & Astrophysics* dédié à H.E.S.S. en 2018 ^[ADDA18]. Ces protons accélérés au niveau de l'onde de choc finissent par s'échapper de la zone d'accélération lorsque l'énergie acquise leur permet d'avoir un rayon de giration plus grand que l'épaisseur du choc. Il est donc possible, si le milieu est assez dense, de traquer l'échappement de ces protons. C'est ce que nous avons fait avec l'étude de W44 et W28 en collaboration avec les collègues japonais des universités de Kyoto (Takaaki Tanaka), de Rikio (Yasunobu Uchiyama) et d'Ibaraki (Hideaki Katagiri).

Enfin, profitant de la sensibilité accrue à haute énergie offerte par les données Pass 8, M. Lemoine-Goumard a développé une chaîne d'analyse permettant d'effectuer une recherche de sources étendues dans les données Fermi du plan galactique au-dessus de 50 GeV afin de dévoiler de nouveaux accélérateurs de rayons cosmiques dans la Galaxie, en collaboration avec les collègues du Goddard Space Flight Center à Washington DC. Cette étude a permis de détecter cinq nouvelles sources étendues qui ont été publiées dans le catalogue 2FHL de la collaboration Fermi ^[ACKE16b]. M. Lemoine-Goumard et M.-H. Grondin ont ensuite poursuivi cet effort à plus basse énergie ($E > 10$ GeV) afin de profiter d'une statistique accrue. Ainsi, 46 sources étendues ont pu être détectées par le LAT et publiées dans *The Astrophysical Journal* ^[ACKE17]. Le résultat le plus gratifiant est certainement la détection du vestige de supernova G150.3+4.5. Cette source n'a pas de contrepartie au TeV ni en rayons X ce qui n'est pas surprenant vu son très large diamètre angulaire de 2.5° défavorable pour les télescopes Tcherenkov et les satellites X tels que XMM-Newton et Chandra dont le champ de vue est limité. Ces études à hautes énergies sur les accélérateurs de protons ont conduit à plusieurs projets collaboratifs, en particulier un majeur concernant la recherche de PeVatrons qui est financé par l'ANR depuis Janvier 2018 et porté par S. Gabici à l'APC (ANR PECORA). Dans ce cadre, Justine Devin a rejoint le groupe le 7 Janvier 2019 pour un post-doctorat de deux ans et conduit à présent avec M.-H. Grondin et M. Lemoine-Goumard des études approfondies sur le vestige de supernova G150.3+4.5, excellent candidat pour CTA. Les premiers résultats ont été présentés au SNR symposium en Crète (Juin 2019). Dans ce contexte, M. Lemoine-Goumard et M.-H. Grondin encadrent depuis Octobre 2018 la thèse d'Arnaud Marès. Les premiers résultats concernant le meilleur candidat PeVatron HESS J1641-463 ont été présentés par A. Marès à l'International Cosmic Ray Conference en Juillet 2019 à Madison (Etats-Unis).

Image composite de la nébuleuse du Crabe par les télescopes Hubble, Chandra et Spitzer.
©NASA, ESA, JPL



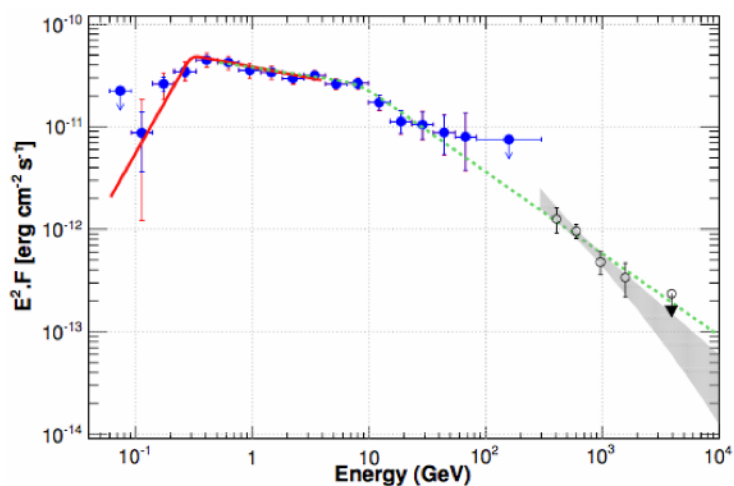
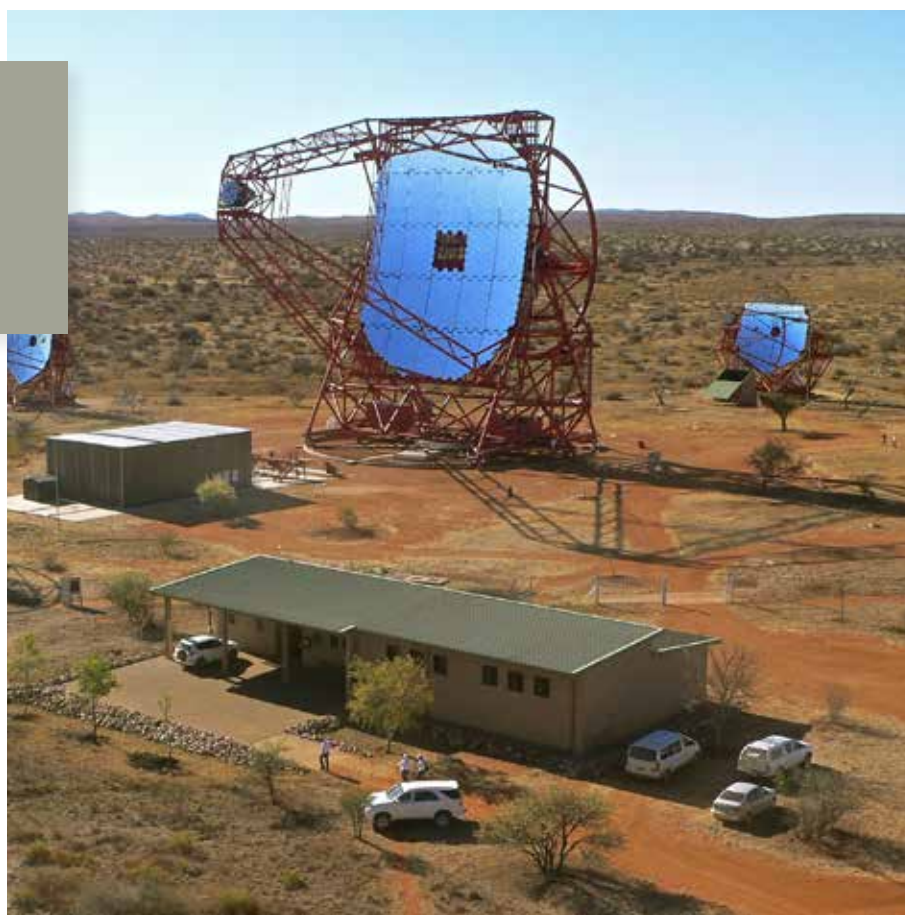


FIGURE 4

Spectre de W49B obtenu avec les données Fermi-LAT et H.E.S.S. publié dans (Abdalla et al. 2018, A&A, 612, A5). La ligne rouge présente le meilleur ajustement entre 60 MeV et 4 GeV pour une loi de puissance cassée tandis que les points bleus montrent les flux mesurés dans chaque intervalle en énergie par Fermi-LAT. La bande grise présente le meilleur ajustement d'une loi de puissance sur les données H.E.S.S. avec les points noirs associés. La ligne verte pointillée présente le meilleur ajustement simultané des données Fermi et H.E.S.S. entre 500 MeV et 10 TeV.

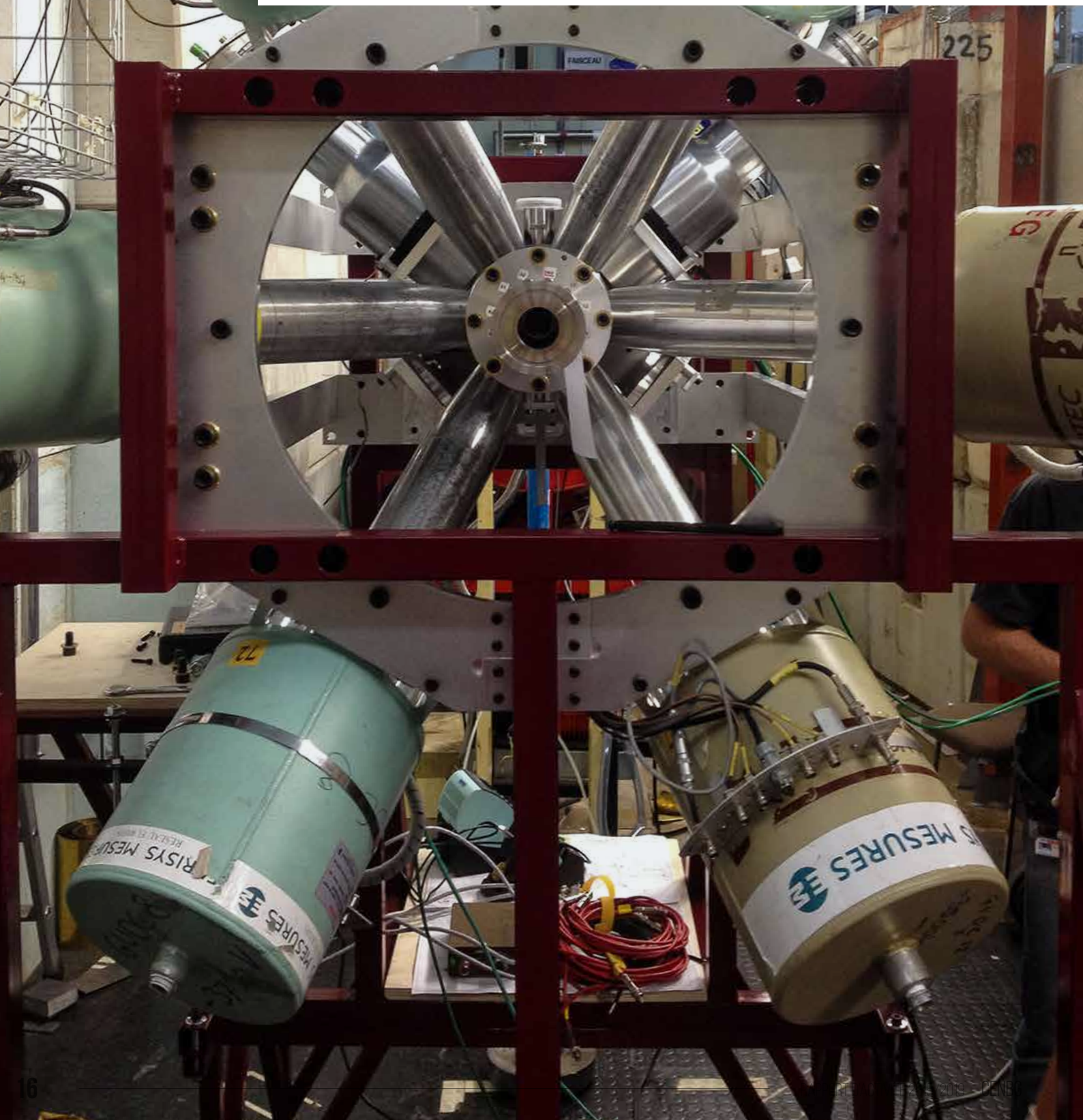
Réseau de
téléscopes
tcherenkov
h.e.s.s.



[ABDO13] A. A. Abdo et al., ApJS 208, 17 (2013)
 [ABDA18] H. Abdalla et al., A&A 612, A5 (2018)
 [ACKE15] M. Ackermann et al., Science 350, 801 (2015)
 [ACKE15b] M. Ackermann et al., ApJ 810, 14 (2015)
 [ACKE16] M. Ackermann et al., A&A 586, A71 (2016)
 [ACKE16b] M. Ackermann et al., ApJS 222, 1 (2016)
 [ACKE17] M. Ackermann et al., ApJ 843, 139 (2017)
 [AJEL17] M. Ajello et al., ApJS 232, 18 (2017)

[LATC20] The Fermi-LAT collaboration, 2020, ApJ Supplement, 247, 33
 [LATC20a] The Fermi-LAT collaboration, 2020, ApJ, 892, 105
 [LI18] J. Li et al., ApJ 858, 84 (2018)
 [MARS15] F. E. Marshall et al., ApJL 807, L27 (2015)
 [MARS16] F. E. Marshall et al., ApJL 827, L39 (2016)
 [SMIT19] D. A. Smith et al., ApJ, 871, 78 (2019)
 [SMIT08] D. A. Smith et al., A&A 492, 923 (2008)

AVAL DU CYCLE ET ÉNERGIE NUCLÉAIRE



ABSTRACT

The activities of the ACEN group presented in this report focus of neutron-induced reaction cross sections and the study of the fission process. The studied nuclei are relevant both to the fuel cycle of current or future nuclear reactors, and to nuclear astrophysics. The group is involved in National and European programs to improve nuclear data bases. This implies efforts devoted to the design of new detectors and to the development of innovative experimental setups and methodologies. The proton-recoil method for the accurate measurement of the neutron flux has been refined by the group to be adapted to the most critical neutron energies for the operation of future nuclear reactors. Studies on surrogate reactions have paved the way to the determination of capture and fission cross sections of highly radioactive nuclei. The group investigates the possibility of performing these studies in inverse kinematics at heavy-ion storage rings, which will allow us to investigate many short-lived nuclei and provide high-quality data. Finally, the fission process itself is studied via measurements for exotic neutron-poor systems for which current models are imprecise or even incorrect and via the development of the fission code GEF.

The presented experiments/studies take place at the AIFIRA platform of the CENBG and at various national (CEA/DAM Bruyères le Châtel, IPN Orsay) and international (GSI/FAIR Darmstadt, JAEA Japan) facilities.

RÉSUMÉ

Les activités du groupe ACEN présentées dans ce rapport s'articulent autour de la mesure de sections efficaces de réaction et de l'étude du processus de fission. Les noyaux étudiés sont importants pour le cycle du combustible des réacteurs actuels ou futurs, et présentent également un intérêt astrophysique. Le groupe est impliqué dans les programmes nationaux ou européens visant à perfectionner les banques de données nucléaires. Cela se traduit par des développements instrumentaux pour concevoir de nouveaux détecteurs, et des méthodologies et dispositifs expérimentaux innovants. La méthode de mesure par proton de recul utilisée par le groupe a été affinée afin d'être adaptée aux énergies de neutron les plus déterminantes pour le fonctionnement des réacteurs nucléaires du futur. Les études sur les réactions de substitution ont ouvert la voie à l'obtention de sections efficaces de fission et de capture radiative de noyaux hautement radioactifs. Le groupe étudie la possibilité de mener ces études en cinématique inverse auprès d'anneaux de stockage d'ions lourds, permettant d'étudier un grand nombre de noyaux de courte durée de vie et de fournir de données de grande qualité. Enfin le processus de fission proprement dit est étudié à partir de mesures des systèmes exotiques riches en protons pour lesquels les modèles actuels sont imprécis voire incorrects, et à partir du développement du code de fission GEF. Les expériences/études présentées ont lieu sur la plate-forme AIFIRA du CENBG et auprès de divers installations nationales (CEA/DAM Bruyères le Châtel, IPN Orsay) ou internationales (GSI Darmstadt, JAEA Japon).

PERMANENTS

Mourad AÏCHE
Serge CZAJKOWSKI
Beatriz JURADO
Paola MARINI
Ludovic MATHIEU
Igor TSEKHANOVICH

POST-DOCTORANTS

David DENIS-PETIT
Ana HENRIQUES
Paola MARINI

DOCTORANTS

Carole CHATEL
Quentin DUCASSE
Ricardo PEREZ-SANCHEZ
Michele SGUAZZIN

COLLABORATIONS

CEA Bruyères-le-Châtel, France

CEA Cadarache, France

CEA Saclay, France

IPN Orsay, France

EC-JRC-Geel, Belgique

LPSC Grenoble, France

GSI Darmstadt, Allemagne

Université de Francfort, Allemagne

Max-Planck Institute for Nuclear Physics, Heidelberg, Allemagne

ILL Grenoble, France

Université de Manchester, Royaume-Unis

Université d'Oslo, Norvège

Lawrence Livermore National Laboratory, Etats Unis

JAEA Tokai, Japon

INTRODUCTION

Les propriétés des actinides, en particulier leurs sections efficaces de réaction, sont connues avec une précision qui est insuffisante pour le développement de réacteurs nucléaires du futur. Depuis les années 2000, le groupe ACEN étudie ces noyaux et mesure leurs propriétés.

Pour ce faire, nous effectuons des mesures par irradiation directe de cibles d'actinides, et nous mesurons le flux de neutron incident par la méthode dite de "proton de recul". Cette méthode permet d'obtenir une grande précision sur la mesure de ce flux. Cependant, son utilisation est délicate pour des énergies de neutron inférieures à 2 MeV. Le groupe ACEN a travaillé ces dernières années à comprendre et résoudre les problèmes liés à cette gamme d'énergie, en particulier avec le développement d'un nouveau Détecteur à Proton de Recul Gazeux.

Une autre méthode employée est de recourir à des réactions de substitution, qui permettent d'obtenir des informations sur des noyaux très radioactifs pour lesquels une mesure par irradiation directe est difficile voire impossible. Cette méthode a par le passé donné de très bon résultats pour obtenir des sections efficaces de fission, mais échouait à prédire les sections efficaces de capture. Le groupe ACEN a réalisé des mesures simultanées de fission et de capture et étudié une méthodologie pour corriger les effets de disparités de spin qui faussaient la détermination de la section efficace de capture. Le groupe travaille également sur la possibilité de réaliser ces réactions de substitution en cinématique inverse auprès d'un anneau de stockage d'ions lourds. Cela donnera accès à beaucoup plus de noyaux, tout en permettant d'obtenir des résultats de plus grande qualité. La possibilité d'étudier les réactions de substitution en cinématique inverse ouvre également des perspectives très intéressantes pour l'astrophysique nucléaire.

Enfin, le groupe étudie également le processus de fission à partir des mesures et de la modélisation en développant le code de fission GEF. Les mesures de fission dans la région des lanthanides riches en protons sont particulièrement intéressantes. Dans cette région, les modèles échouent à prédire les distributions en masse des fragments de fission. Ces expériences permettent d'apporter un nouveau regard sur un processus que l'on croyait bien compris.

MESURE DE FLUX DE NEUTRONS PAR PROTONS DE REcul

MESURES PAR RÉACTIONS DE SUBSTITUTION

MESURES ET MODÉLISATION DU PROCESSUS DE FISSION

UTILISATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES POUR LA DÉTECTION D'IONS LOURDS

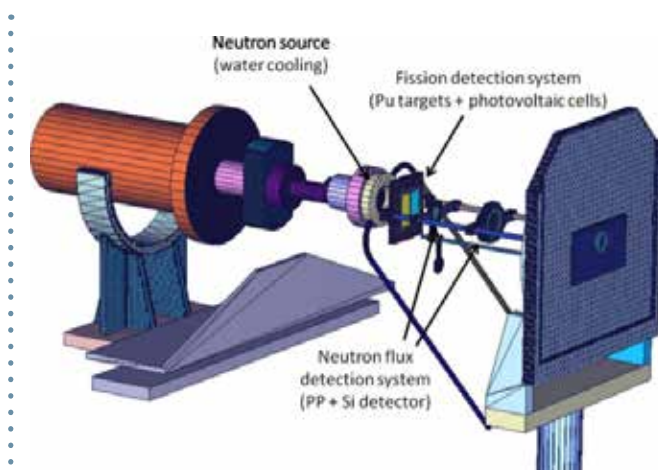


FIGURE 1

Dispositif expérimental, simulé avec MCNP5. Pour des raisons de visualisation, le capot de la chambre de mesure n'a pas été représenté.

MESURES DIRECTES DES SECTIONS EFFICACES DE FISSION D'ISOTOPES DE PLUTONIUM

Ce projet s'inscrit dans la continuation des programmes de mesures de données nucléaires pour l'énergie du futur, et en particulier les mesures de sections efficaces de fission utiles pour les réacteurs à neutrons rapides et pour l'incinération des déchets nucléaires. Ce projet prévoit le développement d'outils et de méthodes qui permettent la mesure quasi-absolue de section efficace de fission dans la région des actinides. Pour atteindre cet objectif, le principe de la méthode est de déterminer avec précision le flux de neutron incident via la section efficace de référence $H(n,p)$. Une bonne connaissance du flux de neutron est indispensable pour obtenir une section efficace de fission de grande précision. Contrairement aux autres réactions standards utilisées (comme $^{235}\text{U}(n,f)$, $^{238}\text{U}(n,f)$ ou $^{237}\text{Np}(n,f)\dots$) la section efficace $H(n,p)$ est la seule connue avec une précision meilleure que 0.5% sur une large gamme en énergie.

Des études de sensibilité ^[NEA] autour des réacteurs du futur de quatrième génération ont mis en évidence, dans le cas des isotopes de $^{240,242}\text{Pu}$, des écarts de précision importants sur le jeu de données des sections efficaces de fissions induites par neutrons. Notre groupe s'est fixé comme objectif de mesurer la section efficace de fission de ^{242}Pu , induite par neutrons de 0.2 à 2 MeV car c'est un point clé de la formation des déchets nucléaires dans les réacteurs utilisant le multi-recyclage du combustible. La section efficace de $^{242}\text{Pu}(n,f)$ a été mesurée plusieurs fois depuis les années 60, surtout dans les années 80 et dans des campagnes très récentes. Les données expérimentales publiées dans la base de données EXFOR montrent des écarts d'environ 15% pour une énergie de neutron comprise entre 1,0 et 1,3 MeV, et 20% au niveau du seuil de fission. Par exemple, les données de Weigmann montrent une structure de résonance significative, alors que d'autres mesures contredisent au moins l'amplitude de la structure. Cet écart est également observé dans les données évaluées de JEFF-3.2 et ENDF/B-VII.1.

Dans une précédente campagne de mesures qui a été menée auprès de l'accélérateur 4 MV Van-de-Graaff de Bruyères-le-Châtel (CEA-DIF), des neutrons de 1.1, 1.5 et 2.0 MeV ont été produits par la réaction $T(p,n)^3\text{He}$, avec une cible solide de TiT (Tritium implanté dans une matrice en Titane). Deux systèmes de refroidissements (air et eau) ont été utilisés pour stabiliser la température de la cible de production de neutrons et éviter ainsi la diffusion du Tritium.

La cible de ^{242}Pu , fabriquée au JRC-Geel par électrodéposition, a été placée dans une chambre à vide. La cible fait face à un panneau de deux cellules photovoltaïques ^[SIEG], qui constituent le détecteur de fission monté dans une géométrie très compacte. Ces cellules ont l'avantage de ne pas être sensibles au bombardement neutronique du faisceau. La séparation complète entre les signaux de la radioactivité alpha et des Fragment de Fission (FF) ^[MARI17] est toutefois limitée par l'activité alpha élevée du ^{242}Pu .

La détermination du flux de neutrons est basée sur la détection, dans une jonction silicium, des protons de recul issus de la diffusion des neutrons du faisceau sur l'hydrogène d'un radiateur de 4 μm de polypropylène (PP) (figure 1). Le spectre en énergie des protons de recul est obtenu avec deux mesures distinctes, une mesure directe suivie d'une mesure de bruit de fond. Deux détecteurs ^3He et BF_3 sont utilisés comme moniteurs du flux de neutrons qui permettent de normaliser les différentes mesures de chaque énergie. Le flux de neutrons arrivant sur le PP n'est pas strictement mono-énergétique. Pour déterminer précisément l'énergie des neutrons incidents et l'efficacité du détecteur Silicium, des simulations de type Monte-Carlo prenant en compte l'ensemble du dispositif expérimental

ainsi que les différents effets cinématiques ou d'anisotropie de la distribution des fragments de fissions, ont été mises en œuvre.

Dans cette gamme d'énergie neutron, nous avons été confrontés à des phénomènes nouveaux : un intense bruit de fond et une de contamination du film de PP par l'huile des pompes. Ces phénomènes sont négligeables à plus haute énergie, mesurée grâce à des films PP épais et à des énergies très supérieures au bruit de fond, mais deviennent fortement gênant pour des énergies autour du MeV utilisant des PP de quelques micromètres seulement. L'analyse des résultats a donc requis des corrections supplémentaires.

L'impact des neutrons diffusés et l'anisotropie de la distribution angulaire des fragments de fission ont été soigneusement étudiés par des simulations et pris en compte dans les résultats finaux. Les simulations montrent que les neutrons diffusés augmentent le taux de fission de 16% dans les configurations les plus défavorables (refroidissement à eau...), ce qui rend la correction cruciale pour obtenir des résultats précis, et indiquent également la nécessité de réduire autant que possible la quantité de matière proche de la source de neutrons. Compte tenu de la géométrie compacte de la cible de fission et du détecteur de fission, l'anisotropie de la distribution angulaire des fragments de fission modifie de manière significative l'efficacité de détection des fragments de fission. Le résultat de cette analyse des données (figure 2), donne des sections efficaces de fission de ^{242}Pu en très bon accord avec les mesures récentes de Tovesson et al. ^[TOVE09] et Matei et al. ^[MATE17] et en accord également avec les données de Salvador-Castiñeira et al. ^[SALV15] au-dessus de 1.0 MeV. L'allure de $\sigma(n,f)$ du ^{242}Pu mesurée diffère de celle donnée dans les bibliothèques JEFF3.2 et ENDF/B-VII.1. Ces résultats ont été publiés ^[MARI17a].

Finalement, cette expérience dans cette gamme d'énergie neutron nous a permis de dresser une liste assez exhaustive des différentes sources d'incertitudes expérimentales, et de comprendre et développer les outils de simulations nécessaires pour l'obtention des sections efficaces absolues.

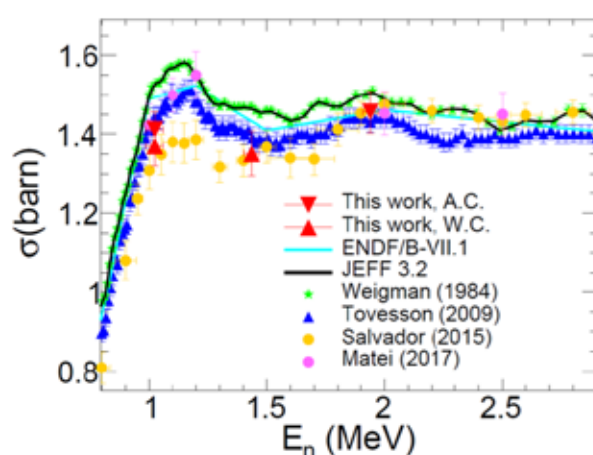


FIGURE 2

Comparaison de nos résultats avec les systèmes de refroidissement à eau (triangles rouges) et à air (triangles rouges inversés) aux évaluations (JEFF 3.2 et ENDF/B-VII.1) et aux expériences les plus pertinentes.

Suite aux résultats de l'expérience de mesure de la section efficace de fission du ^{242}Pu dans la région du MeV, nous avons entrepris le développement d'un détecteur à proton de recul et de méthodes de mesure adaptés à cette gamme d'énergie.

Nous avons tout d'abord réalisé en 2015 et 2016 des expériences sur la plateforme AIFIRA afin de comprendre l'origine du bruit de fond observé dans le détecteur à proton de recul ^[MARI17b]. Nous avons ainsi pu déterminer que le bruit de fond vient des électrons Compton générés par le flux de gamma en provenance de la source de production de neutron (gamma directs ou produits par capture des neutrons). Ces électrons n'interagissent que très faiblement dans le détecteur silicium mais contrairement aux protons de recul qui n'interagissent que dans les premiers microns du détecteur, les électrons déposent de l'énergie dans toute l'épaisseur et sont suffisamment nombreux pour créer un signal significatif jusqu'à 1 MeV environ.

Afin de développer un détecteur insensible aux électrons/gamma, le groupe ACEN a opté pour un détecteur gazeux à proton de recul (DGPR), dont l'épaisseur effective du gaz est réglée par un ajustement de la pression. Ce détecteur peut donc être adapté au parcours du proton, et donc à l'énergie des neutrons incidents.

Un prototype de DGPR a été conçu en 2016. Depuis fin 2018, le développement de ce prototype fait partie de la thèse de Carole Chatel. Des radiateurs de différentes épaisseurs peuvent être montés sur un disque porte-échantillon. Un premier collimateur permet de définir précisément la surface active de l'échantillon utilisé. Un deuxième collimateur permet de sélectionner précisément l'angle solide de détection, et de définir une efficacité de détection précise. Il sépare également le volume de gaz en deux chambres distinctes : ΔE et E. Un champ électrique permet alors aux électrons primaires d'ionisation de dériver vers le plan de détection. L'homogénéité de ce champ électrique dans cette géométrie très compacte est assurée par la présence d'une cage à dérive. Le plan de détection est un détecteur Micromégas segmenté en 64 pads :

cela permet d'amplifier les signaux reçus tout en fournissant une indication sur la trajectoire du proton.

Des expériences ont eu lieu sur la plateforme AIFIRA pour tester et améliorer ce détecteur ^[MARI19]. Elles ont permis de valider certaines caractéristiques importantes du détecteur :

Insensibilité aux électrons/gammas

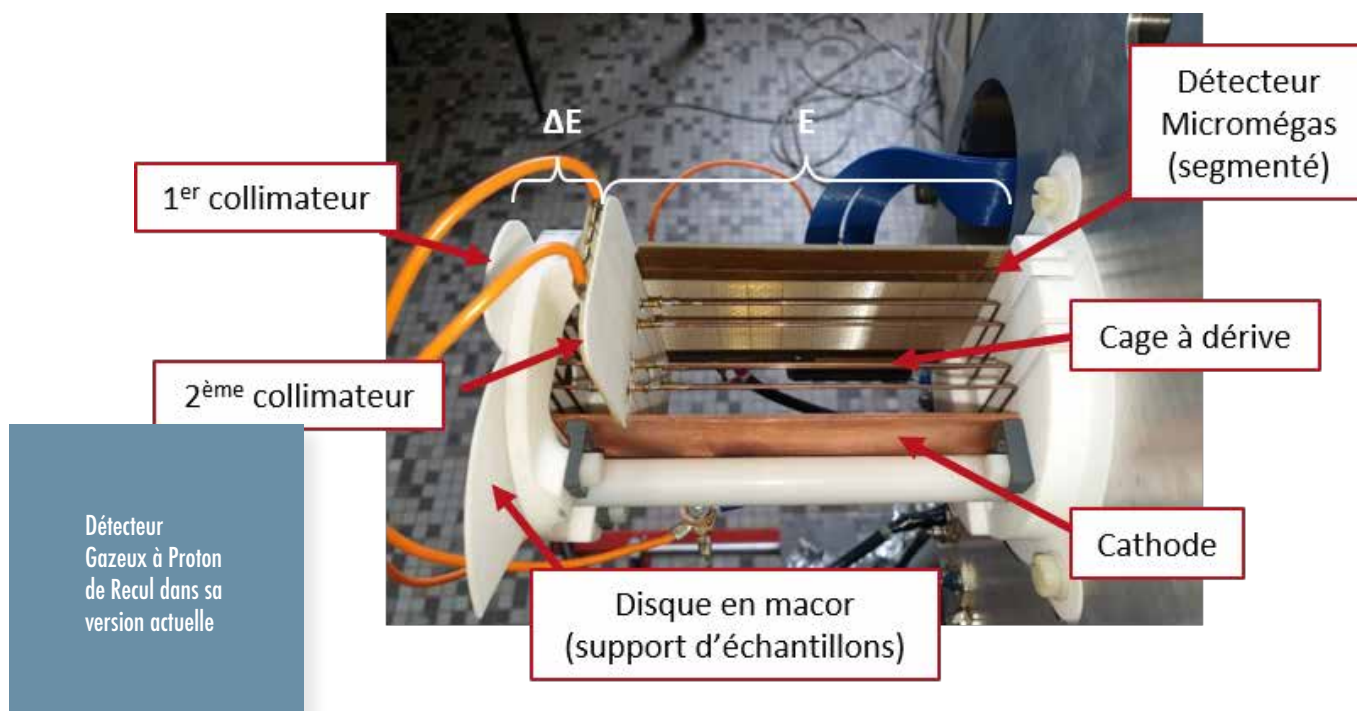
- En l'absence de radiateur et compte tenu des conditions de déclenchement (coïncidence ΔE -E), très peu de signaux sont mesurés. Ceci confirme la pertinence du choix d'un détecteur à gaz et d'un Micromégas segmenté pour des mesures de proton de recul en environnement électron/gamma intense.
- Le détecteur présente un fonctionnement stable pendant l'irradiation malgré des hauts flux de particules : les phénomènes d'accumulation de charge électrostatique observés initialement sont résolus par la présence de la cage à dérive.

Reconstruction de la trace

- Les trajectoires des protons de recul ou d'autres particules parasites (comme des rayons cosmiques) peuvent être reconstruites.
- Cela permet de discriminer de potentielles traces anormales de particules parasites qui auraient déposé de l'énergie dans les deux chambres.
- La 3e dimension peut être obtenue grâce au temps de dérive des électrons, ce qui permet d'affiner l'estimation du parcours des protons de recul dans le gaz.

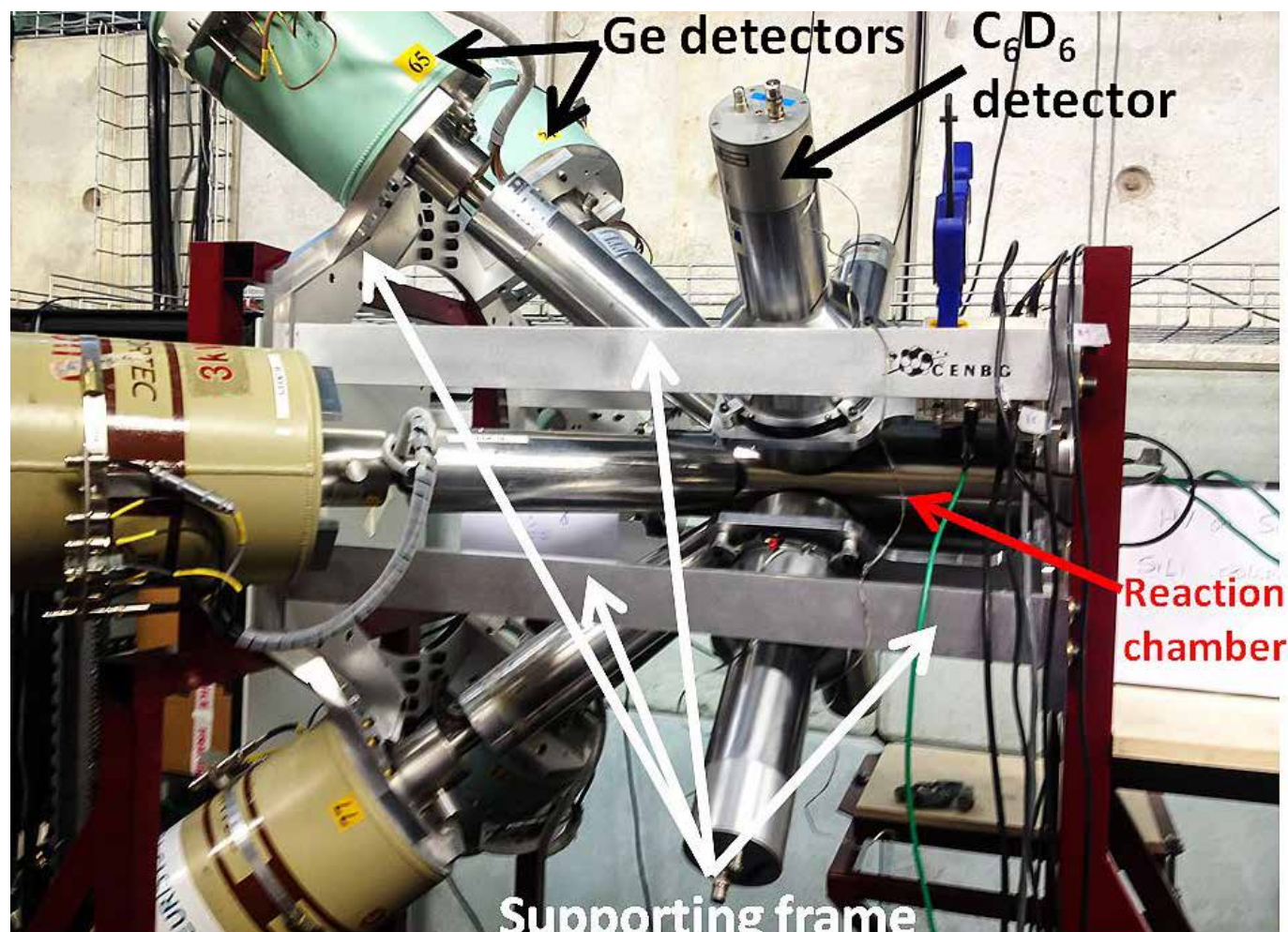
Une nouvelle expérience est prévue sur AIFIRA en 2020 avec un micro-faisceau incident de protons, directement envoyé dans le détecteur. Le comptage du nombre de protons détectés par le DGPR et par une jonction Si située en aval permettra de valider le fonctionnement du détecteur (efficacité intrinsèque de 100%, mesure de temps mort...), et de mieux caractériser son fonctionnement (homogénéité du champ électrique sur les bords, perte de résolution par la dérive des électrons...).

Une fois le concept validé, un nouveau détecteur sera conçu à partir du retour d'expérience du prototype du DGPR. Celui-ci devrait être opérationnel pour des expériences de mesure de sections efficaces à partir de 2022.

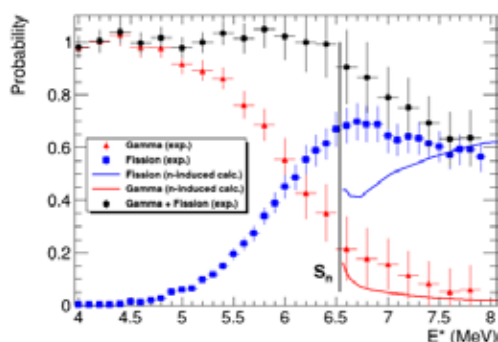


La définition et l'évaluation des nouveaux concepts de réacteurs et des différentes options pour le traitement de déchets nucléaires, la recherche de radio-isotopes en médecine ou encore la compréhension de la nucléosynthèse stellaire sont basées sur des simulations qui reposent sur des sections efficaces induites par neutrons sur des noyaux radioactifs. Cependant, très souvent, ces sections efficaces sont extrêmement difficiles (voire impossibles) à mesurer en raison notamment de la forte radioactivité des cibles concernées. Cette difficulté peut être surmontée en utilisant des réactions de substitution, c'est-à-dire des réactions alternatives (typiquement des réactions de transfert ou de diffusion inélastique) donnant lieu au même noyau excité que celui formé lors de la réaction neutronique d'intérêt. Les probabilités de fission et d'émission γ induites par les réactions de substitution permettent de contraindre très fortement les paramètres des modèles de désexcitation du noyau et ainsi d'obtenir des prédictions beaucoup plus précises des sections efficaces neutroniques d'intérêt. Les réactions de substitution présentent deux grands avantages. D'une part elles permettent l'utilisation de cibles stables ou beaucoup moins radioactives que la cible associée à la réaction neutronique d'intérêt et d'autre part elles donnent accès à des énergies d'excitation en dessous de l'énergie de séparation neutron, une région inaccessible à la spectroscopie neutronique.

Nos travaux précédents ont montré que pour contraindre les modèles décrivant la désexcitation de noyaux avec les probabilités d'émission γ il faut prendre en compte la différence entre les moments angulaires peuplés par la réaction induite par neutron et ceux peuplés par la réaction de substitution, tandis que les probabilités de fission sont beaucoup moins sensibles à ces différences [DUCAIG]. Afin de comprendre ces résultats, nous avons développé une méthodologie et un dispositif expérimental [PERE19] pour mesurer simultanément des probabilités de fission et d'émission γ induites par des réactions de substitution (photo p.23). La mesure de la probabilité d'émission γ dans un domaine d'énergie d'excitation où la voie de fission est ouverte constitue un défi considérable à cause du bruit de fond provenant des rayonnements γ émis par les fragments de fission. Lors de notre dernière expérience, réalisée en Avril 2017 auprès de l'accélérateur tandem de l'IPN d'Orsay, nous avons étudié la réaction de substitution de diffusion inélastique $^{240}\text{Pu}(^4\text{He}, ^4\text{He}')^{240}\text{Pu}^*$. Cette réaction est particulièrement intéressante car le noyau fissionnant $^{240}\text{Pu}^*$ est un noyau pair-pair dont la densité de niveaux autour de la barrière de fission est plus faible que pour les noyaux pair-impairs ou impair-impairs que nous avons étudiés jusqu'à présent et nous nous attendons à ce que sa probabilité de fission soit plus sensible aux différences de moment angulaire. En outre, la réaction induite par neutrons associée est $n + ^{239}\text{Pu}$, pour laquelle les sections efficaces de fission et de capture sont bien connues. Nous pouvons ainsi vérifier si les probabilités obtenues à l'aide de cette réaction de substitution sont en bon accord avec celles induites par neutron. Cette étude a fait l'objet de la thèse de Ricardo Perez [PERE19a].

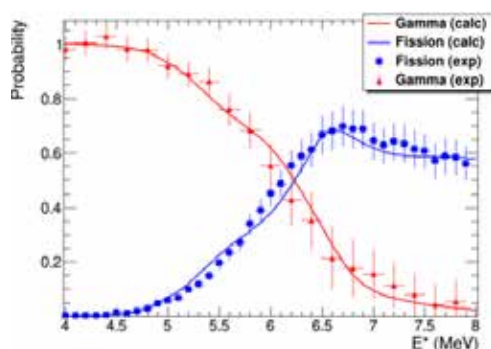


La **figure 3** montre les probabilités de fission et émission γ obtenues pour la réaction $^{240}\text{Pu}(^4\text{He}, ^4\text{He}')^{240}\text{Pu}$. Pour le ^{240}Pu la barrière de fission est inférieure à l'énergie de séparation neutron S_n . Par conséquent, deux voies de désexcitation sont ouvertes pour ce noyau en dessous de S_n , l'émission γ et la fission, et la somme de leurs probabilités doit être égale à 1. Cette condition est satisfaite par nos données, comme on peut le voir sur la partie gauche de la **figure 3**. Ce résultat est très important car il nous a permis de valider la méthodologie développée pour extraire les deux probabilités. Par ailleurs, cette fois ci nous observons des différences considérables entre nos résultats et les probabilités induites par neutron à la fois pour la probabilité de fission et d'émission γ . Nous attribuons ces écarts aux différences entre les moments angulaires peuplés. La **figure 4** montre nos résultats expérimentaux comparés avec des calculs comprenant la modélisation de la voie d'entrée (afin de déterminer la distribution de moment angulaire et parité peuplée lors de la réaction $^{240}\text{Pu}(^4\text{He}, ^4\text{He}')^{240}\text{Pu}$) et la modélisation de la désexcitation du noyau $^{240}\text{Pu}^*$ (à l'aide du modèle statistique avec des paramètres fixés au préalable avec les données neutroniques). L'accord est très bon, ce qui démontre la bonne compréhension du mécanisme de réaction mis en jeu. C'est un résultat important car cela implique qu'il est possible de procéder à l'inverse, c'est-à-dire d'utiliser les probabilités de désexcitation induites par des réactions de substitution pour conforter la valeur des paramètres clés du modèle statistique et ainsi obtenir des prédictions beaucoup plus précises de sections efficaces de noyaux de courte durée de vie qui ne sont pas directement mesurables.



Probabilité de fission (bleu) et d'émission gamma (rouge) en fonction de l'énergie d'excitation du ^{240}Pu . La somme des deux probabilités est représentée par les cercles noirs et les lignes représentent les probabilités induites par neutron. La ligne verticale noire représente l'énergie de séparation neutron S_n du ^{240}Pu . Les lignes représentent les probabilités de dés-excitation induites par l'absorption d'un neutron.

FIGURE 3



Probabilités d'émission γ (triangles rouges) et de fission (carrés bleus) en fonction de l'énergie d'excitation du ^{240}Pu mesurées pour la réaction $^{240}\text{Pu}(^4\text{He}, ^4\text{He}')$.

FIGURE 4

Les mesures de substitution en cinématique directe présentées dans la section précédente souffrent souvent de limitations importantes, notamment à cause du bruit de fond créé par les réactions avec les contaminants de la cible et de son support. Ce bruit peut parfois compromettre la mesure ou la rendre impossible. Par ailleurs, les résidus produits après l'émission de rayonnements γ ou de neutrons nécessite donc de détecter les rayonnements γ ou les neutrons émis lors de la désexcitation. Ceci est compliqué car les efficacités associées sont généralement très faibles (quelques pour cent seulement) et, dans le cas des neutrons, très difficiles à mesurer.

Ces limitations peuvent être surmontées en mesurant les probabilités de désexcitation en cinématique inverse auprès d'un anneau de stockage, un faisceau d'ions lourds impactant alors une cible de noyaux légers. Le problème des contaminants et du support de la cible est résolu grâce à l'utilisation, à l'intérieur de l'anneau, de cibles à jet de gaz pures, sans fenêtre et ultra-minces. En outre, la cinématique inverse permet la détection des résidus produits après émission γ et de neutrons avec des efficacités bien plus importantes qu'en cinématique directe. Par ailleurs, les faisceaux stockés refroidis par un "electron cooler" ont une qualité exceptionnelle, qui est rétablie après chaque passage à travers de la cible. Ceci permet de négliger les effets de straggling et de perte d'énergie dans la cible et conduit à une excellente résolution en énergie d'excitation. Enfin, grâce à la cinématique inverse, il est possible d'étudier de nombreux noyaux à durée de vie très courte dont les cibles sont très difficiles à produire. Par conséquent, les anneaux de stockage apparaissent comme les dispositifs idéaux pour effectuer des mesures de probabilités de désexcitation en cinématique inverse induites par des réactions de substitution.

Les anneaux de stockage constituent des environnements particuliers : ils fonctionnent en ultravide, à savoir 10^{-11} - 10^{-12} mbar, afin de limiter drastiquement les interactions entre les ions du faisceau et des atomes résiduels qui réduisent rapidement l'intensité du faisceau stocké. Les conditions d'ultravide à l'intérieur de l'anneau imposent des contraintes majeures aux détecteurs de particules utilisés pour les expériences.

Le CENBG vise à développer une toute nouvelle méthodologie pour mesurer simultanément les probabilités de fission, d'émission γ et de neutrons avec une haute précision auprès de l'anneau de stockage CRYRING de l'installation GSI/FAIR.

Le système de détection requis est illustré sur la **figure 5**. Il comprend un détecteur de particules pour identifier et mesurer les énergies cinétiques et les angles des résidus de la cible, un second détecteur pour les fragments de fission en coïncidence avec ces résidus, et un troisième pour détecter les résidus du projectile produits après émission gamma ou de particules, toujours en coïncidence avec les résidus de la cible. Ce dernier détecteur est placé après les deux dipôles situés en aval de la cible. Nous avons réalisé des simulations très détaillées pour ce dispositif qui montrent qu'il est possible de mesurer simultanément les probabilités de toutes les voies de désexcitation ouvertes avec une résolution en énergie d'excitation d'environ 200-300 keV et des efficacités de détection proches de 100% pour les résidus de toutes les voies de désexcitation. L'installation GSI/FAIR produit une multitude de faisceaux d'actinides tels que $^{237, 238}\text{Np}$, $^{233, 234, 235, 236, 237, 238}\text{U}$, $^{230, 231, 232}\text{Th}$ de grand intérêt pour les cycles du combustible U et Th. GSI/FAIR produit aussi des faisceaux d'actinides déficients en neutrons autour de la fermeture de couche $N=126$. Nos études

dans cette région seront très utiles pour améliorer les modèles qui fourniront à leur tour des prédictions beaucoup plus fiables autour de la fermeture en couche $N=184$ qui a une grande importance en astrophysique nucléaire.

Nous envisageons d'utiliser des cellules photovoltaïques pour détecter les fragments de fission et les résidus produits après émission γ et neutron. Les cellules photovoltaïques représentent une alternative particulièrement intéressante et économique aux détecteurs Si car elles ont des performances tout à fait satisfaisantes, mais sont beaucoup plus résistantes à l'irradiation et ont un coût particulièrement abordable. En 2018 et 2019 nous avons étudié la réponse des cellules photovoltaïques avec les faisceaux d'ions lourds du GANIL. Les résultats sont extrêmement positifs car nous avons obtenu une résolution d'environ 3% en énergie et de 4-5 ns en temps. C'est la première fois que des cellules ont été utilisées pour la détection d'ions lourds avec des énergies d'environ 10 A MeV. Nos résultats ouvrent des perspectives particulièrement intéressantes pour leur utilisation dans des installations de faisceaux radioactifs (mesure d'intensité ou monitoring) qui vont bien au delà de notre projet. Ce projet a été lauréat d'une bourse européenne de post-doctorat Marie Curie (boursière : Ana Henriques), une bourse de thèse internationale du CNRS (boursier : Michele Sguazzin) et en 2020 une bourse ERC-Advanced (porteur : Beatriz Jurado).

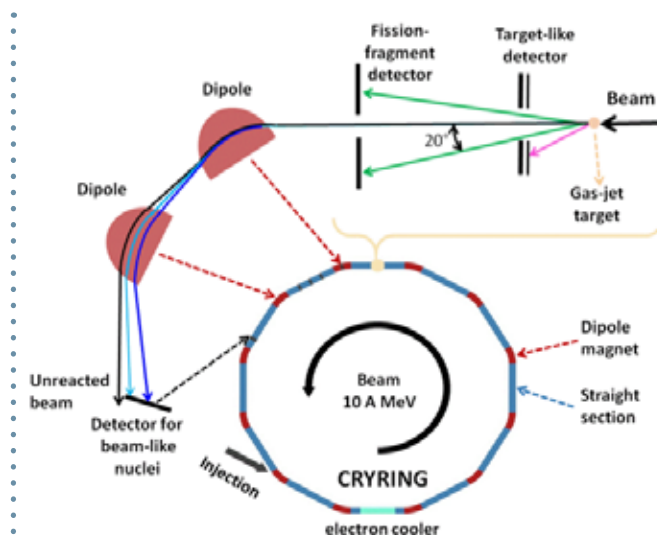


FIGURE 5

Vue schématique du dispositif que nous voulons développer. L'anneau de stockage CRYRING est montré dans la partie inférieure. La partie supérieure montre les détecteurs de particules qui seront placés à l'intérieur de l'anneau.

5

LE CODE DE FISSION GEF (GENERAL DESCRIPTION OF FISSION OBSERVABLES)

Depuis 2009 nous travaillons avec Karl-Heinz Schmidt sur le développement du code de fission GEF^[GEF19]. GEF est un modèle semi-empirique de fission qui, contrairement à la plupart des modèles de fission, prédit pratiquement toutes les observables de fission ainsi que les corrélations entre les différentes observables pour un grand nombre de noyaux. Plus précisément, GEF calcule les distributions isotopiques des fragments de fission, leurs énergies cinétiques, ainsi que le nombre et les spectres en énergie des neutrons et γ prompts pour des noyaux fissionnants allant de l'osmium jusqu'à l'élément $Z=120$ et pour des énergies d'excitation jusqu'à 100 MeV.

Le code est basé sur des concepts physiques fondamentaux, ce qui lui donne un fort pouvoir prédictif. Les deux idées principales qui sous-tendent GEF sont l'approche macroscopique-microscopique et le principe de séparabilité. Ce dernier établi que la partie macroscopique du potentiel est déterminé par les propriétés du noyau fissionnant, tandis que les effets de couche sont déterminés par le nombre de nucléons des fragments de fission. Ceci implique que les effets de couches sont uniquement liés aux fragments de fission et sont donc les mêmes pour tous les noyaux fissionnants. Dans GEF les effets de couches sont déduits d'une étude systématique des distributions isotopiques expérimentales. Par ailleurs, la transformation d'une partie de la chaleur de réaction en énergie d'excitation et le partage de cette énergie d'excitation entre les deux fragments de fission sont rigoureusement définies par les lois de la mécanique statistique.

En 2016 nous avons publié un article très détaillé sur GEF^[SCHM16]. Cet article contient une description des principes physiques sur lesquels repose le code, ainsi qu'une évaluation du code à partir d'une comparaison très exhaustive avec les données existantes. L'accord entre GEF et les données expérimentales est très satisfaisant. En effet, les déviations (quantifiées par l'estimateur χ^2) entre les rendements de fission calculés par GEF et de certaines

données expérimentales varient entre $\chi^2 = 0.3$ et 1.7 pour 85% des cas étudiés. Il est important de signaler que pour la plupart de cas où le χ^2 est supérieur à 1.7, les déviations viennent du manque de qualité de données expérimentales et non pas du modèle. Ceci reflète très clairement l'utilité de GEF pour l'évaluation de données car GEF permet de détecter des incohérences dans les données nucléaires et de corriger et compléter les résultats expérimentaux. De ce fait GEF est devenue un outil précieux pour la simulation d'expériences en physique nucléaire, pour l'évaluation de données et pour des applications dans l'industrie. Du fait de son pouvoir prédictif, GEF a été aussi utilisé pour prédire les abondances élémentaires produites dans le processus r de nucléosynthèse qui a lieu lors de la fusion des étoiles à neutrons et qui fait intervenir des noyaux fissionnants situés très loin de la vallée de stabilité.

Nous avons mis les idées sur lesquelles repose GEF en perspective par rapport à d'autres modèles et approches théoriques dans un article de revue sur la fission nucléaire que nous avons publié récemment^[SCHM18]. Dans^[SCHM18a] nous avons comparé les prédictions de GEF avec des nouvelles données et en particulier avec les distributions isotopiques des fragments issues des expériences récentes à GSI (SOFIA) et sur VAMOS au GANIL. Ces données sont particulièrement utiles pour contraindre les modèles car elles sont très précises et parce que parce qu'il faut modéliser pour les décrire la répartition de protons et de neutrons entre les deux fragments. L'accord entre ces données et GEF, dont les paramètres n'ont pas été ajustés pour les reproduire, est particulièrement bon, ce qui démontre le grand pouvoir prédictif de GEF.

Dans le cadre de mesures des données nucléaires relatives à l'astrophysique et aux applications nucléaires et de la compréhension fondamentale du processus de fission, le groupe ACEN étudie les propriétés fondamentales de la réaction de fission dans deux domaines bien différents : les actinides et les noyaux fortement déficients en neutrons (aux alentours du ^{180}Hg). Ces études impliquent l'usage des réactions de transfert avec un faisceau de ^{18}O pour des cibles transuraniennes, ainsi que des réactions de fusion complète, pour pouvoir produire et étudier la fission des noyaux exotiques (à très courte durée de vie et à basse valeur d'isospin) autour du ^{180}Hg . Les mesures avec des actinides sont justifiées par l'absence des données correspondantes, surtout à haut spin et haute énergie d'excitation. L'intérêt pour la fission des noyaux proches du ^{180}Hg provient des propriétés inattendues de ces noyaux, telles que la division en fragments de masses inégales (fission asymétrique) – que nous connaissons pour les actinides - expérimentalement découverte en 2010 [ANDR2010]. La fission asymétrique du ^{180}Hg a rapidement mené à la prédiction d'une nouvelle région de la fission asymétrique dans les noyaux exotiques riche en protons (figure 6). Grâce à son actualité et à sa nouveauté, la thématique bénéficie d'une attention particulière et a une forte visibilité internationale.

Du fait de la disponibilité des faisceaux dans la gamme d'énergie nécessaire, ce travail s'effectue auprès du tandem de l'Agence Japonaise à l'Energie Atomique (JAEA) au sein d'une collaboration internationale (UK, Japon et France). Dans ce travail collaboratif, l'équipe ACEN a pris des responsabilités et des initiatives importantes (porte-parole et leadership dans le projet fusion-fission). Ceci se reflète dans une série d'expériences déjà effectuées ou proposées.

Au cours de la période de 2015-2019, la collaboration a notamment obtenu et publié des résultats importants :

Fission des noyaux $^{180,190}\text{Hg}$ formés dans les réactions de fusion $^{36}\text{Ar} + ^{144,154}\text{Sm}$ [NISH15]. Cette étude a confirmé la découverte de la nouvelle région de fission asymétrique prédite théoriquement (figure 6). Elle a également montré que la distribution des produits de fission en masse est peu sensible à la valeur de l'énergie d'excitation du noyau fissionnant : une propriété inattendue au vu de nos connaissances sur la région des actinides, où la fission asymétrique est notoirement très affectée par l'énergie d'excitation.

Faisabilité de l'utilisation des réactions de transfert de multi-nucléons pour des études des propriétés de fission dans le domaine des actinides [LEQU16]. On a notamment montré qu'avec un faisceau de ^{18}O et une cible d'actinide (comme ^{232}Th) la réaction de transfert de plusieurs nucléons est capable de produire à la fois une dizaine des noyaux (de durée de vie courte) dans une gamme d'énergie d'excitation allant jusqu'à 60 MeV, ce qui permet de faire, par exemple, des études systématiques simultanées de leurs distributions en masse qui ne sont pas possibles avec des méthodes traditionnelles (absorption de neutron ou de particule chargée légère).

Rôle des chances de fission dans les distributions en masse des actinides à des énergies d'excitation élevées (jusqu'à 60 MeV, [HIRO17]). En utilisant les résultats expérimentaux issus des réactions de transfert avec ^{18}O et en s'appuyant sur les probabilités des chances de fission obtenues avec le code GEF [GEF19], il a été possible, pour la première fois, de reproduire les données mesurées avec un modèle théorique (approche Langevin),

en tenant compte de l'émission des neutrons par les noyaux composés avant la fission.

Etude expérimentale des barrières de fission. Toujours en utilisant les réactions de transfert, on a pu, à partir des probabilités de fission, extraire la hauteur de la barrière de fission pour les canaux de transfert $2n$ et $pn/p2n$ dans le domaine des actinides [KEAN19]. Ces résultats ont montré le potentiel de la méthode de transfert pour l'accès aux paramètres de la barrière de fission de noyaux autrement inaccessibles (à cause de leur courte durée de vie).

Coexistence de modes de fission (fission symétrique et fission asymétrique) dans le ^{178}Pt [TSEK19] synthétisé dans la réaction de fusion $^{36}\text{Ar} + ^{142}\text{Nd}$. Pour la première fois dans la région du ^{180}Hg , grâce à la corrélation masse – énergie cinétique totale (A-TKE) obtenue dans l'expérience (figure 7), on a fourni une preuve expérimentale directe de la présence de ces deux modes de fission dans les distributions en masse mesurées, de même qu'on a réussi à quantifier leur poids, en fonction de l'énergie d'excitation du ^{178}Pt . Les résultats de cette étude montrent également que les modes de fission (largeurs et valeurs caractéristiques de TKE) ne sont apparemment pas affectés par le rapport N/Z (donc, par la valeur de l'isospin) qui est très différent entre le ^{178}Pt et les actinides.

Effet du moment angulaire sur les propriétés de fission. N'étant pas clairement accessible par des réactions d'absorption de neutron ou avec des particules chargées légères (proton, alpha), cet effet peut être étudié grâce aux méthodes de fusion-fission et aux réactions de transfert de plusieurs nucléons. Les premiers résultats obtenus pour les distributions en masse ont montré que ces dites distributions ne sont pas influencées par la méthode de production du noyau fissionnant, et ne sont donc pas sensibles au moment angulaire de ce noyau [VERM19].

Le groupe va poursuivre ces efforts dans la thématique de fission surtout en ce qui concerne l'influence de l'isospin et du moment angulaire sur les propriétés de fission. Notamment, dans le futur immédiat, on effectuera l'analyse des données pour la fission des noyaux avec $N=100$ (^{176}Os , ^{177}Ir et ^{179}Au , figure 6) synthétisés au JAEA en 2019 dans les réactions de fusion du ^{35}Cl avec ^{141}Pr , ^{142}Nd et ^{144}Sm . En plus des distributions en masse, l'émission de neutron prompt a été mesurée dans l'expérience à l'aide du dispositif expérimental développé.

Une expérience d'importance majeure est également envisagée dans un futur proche, dans laquelle seront étudiées les propriétés de fission des noyaux ^{180}Hg , ^{178}Au et ^{178}Pt , produits dans les réactions de fusion du ^{90}Zr avec des noyaux similaires ($N=50$). Par rapport à toutes les mesures précédentes, la fusion des noyaux fortement liés (comme ^{90}Zr) permettra d'abaisser l'énergie d'excitation des noyaux formés jusqu'au niveau de l'énergie de séparation d'un neutron et donc d'obtenir une information plus claire et pertinente sur le rôle des effets microscopiques dans la fission de la matière nucléaire exotique, ainsi que d'examiner les effets liés au moment angulaire induit.

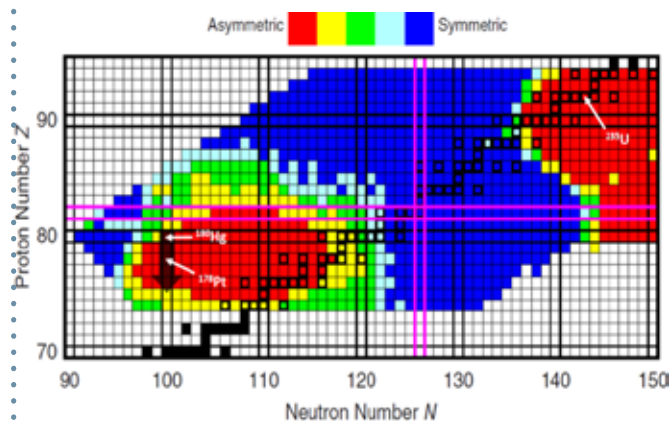


FIGURE 6

Rendements de fission calculés dans la région des noyaux de $73 < Z < 95$ and $89 < N < 151$ [MOLL15]. Le code de couleur indique différents rapports entre les composantes symétriques (en bleu) et asymétriques (en rouge) des distributions de masse attendues. Les flèches indiquent les noyaux que nous avons étudiés.

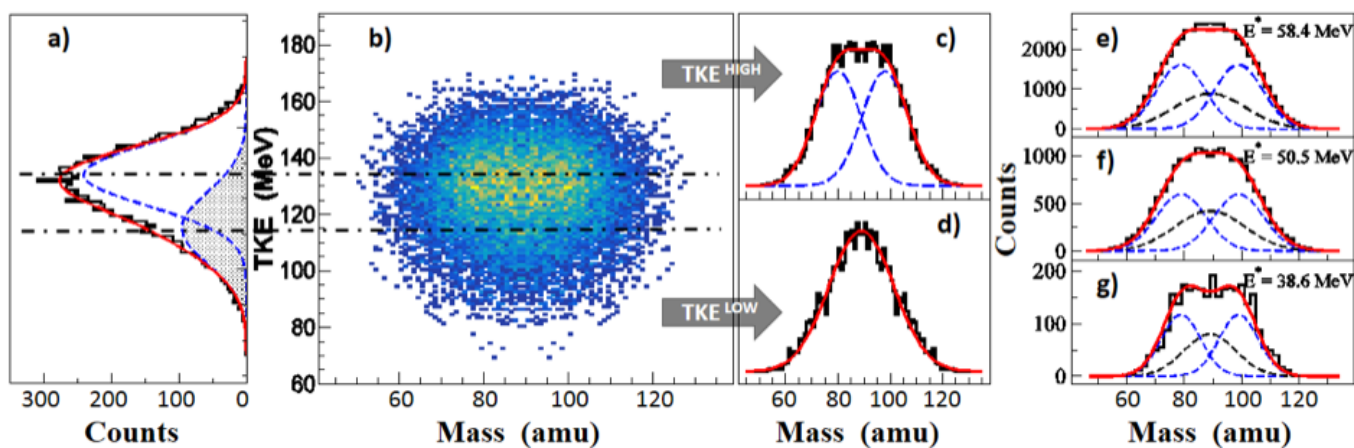
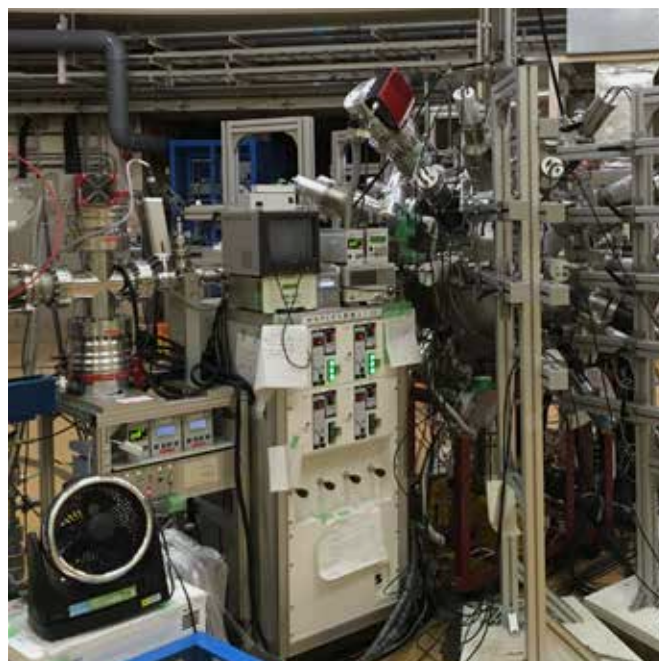


FIGURE 7

Identification des modes de fission de ^{178}Pt à l'aide des corrélations entre l'énergie cinétique (TKE) et la masse des fragments a) : distribution des TKE pour une énergie de faisceau de 170 MeV (projection de b) sur l'axe vertical) déconvoluée en ses composantes symétrique et asymétrique. b) : corrélation TKE – masse des fragments. L'axe vertical est commun aux figures a) et b). c) & d) : Spectres en masse des fragments, correspondant aux parties supérieure (TKEhigh) et inférieure (TKElow) de la distribution des TKE, parties délimitées par les lignes horizontales pointillées sur les figures a) et b), ainsi que les fits correspondants ajustés avec une double et simple gaussienne non contrainte (courbes rouges). e-g) : Distributions totales des masses des fragments de fission à différentes énergies d'excitation du noyau composé. Les courbes rouges sont ajustées sur les données expérimentales en fixant les positions des modes symétrique et asymétrique à partir des spectres d) et c). En pointillé bleu et noir, les composantes asymétrique et symétrique, respectivement.

[ANDR10] A.N. Andreyev et al., Phys. Rev. Lett. 105, 252502 (2010)
 [DUCAS16] Q. Ducasse et al., Phys. Rev. C 94, 024614 (2016)
 [DUPU19] Marc Dupuis, CEA/DAM, Communication privée (2019)
 [GEF19] www.cenbg.in2p3.fr/GEF
 [HIRO17] K. Hirose et al., Phys. Rev. Lett. 119, 222501 (2017)
 [KEAN19] K.R. Kean et al., Phys. Rev. C 100, 014611 (2019)
 [LEQU16] R. Léquillon et al., Phys. Lett. B 761, 125 (2016)
 [MARI17a] P. Marini et al., Phys. Rev. C 96, 054604 (2017)
 [MARI17b] P. Marini et al., Nucl. Instr. and Meth. A 841, 56 (2017)
 [MARI19] P. Marini et al., Rad. Meas. 124, 9 (2019)
 [MATE17] C. Matei et al., Phys. Rev. C 95, 024606 (2017)
 [MOLL15] P. Moller et al., Phys. Rev. C 91, 044316 (2015)
 [NEA] NEA Nuclear Data High Priority Request List, <http://www.nea.fr/html/dbdata/hprl/>

[NISH15] K. Nishio et al., Phys. Lett. B 748, 89 (2015)
 [PERE19] R. Pérez Sánchez et al., Nucl. Instrum. Meth. A 933, 63 (2019)
 [PERE19a] R. Pérez Sánchez, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux (2019)
 [SALV15] P. Salvador-Castiñeira et al., Phys. Rev. C 92, 044606 (2015)
 [SCHM16] K.-H. Schmidt et al., Nuclear Data Sheets 131, 107 (2016)
 [SCHM18] K.-H. Schmidt et al., Rep. Prog. Phys. 81, 106301 (2018)
 [SCHM18a] C. Schmitt et al., Phys. Rev. C 98, 044605 (2018)
 [SIEG79] G. Siebert, Nucl. Instr. and Meth. 164, 437 (1979)
 [TOVE09] F. Tovesson et al., Phys. Rev. C 79, 014613 (2009)
 [TSEK19] I. Tsekhanovich et al., Phys. Lett. B 790, 583 (2019)
 [VERM19] M. Vermulen et al., soumis à Phys. Rev. C

EXCITATIONS NUCLÉAIRES PAR LASERS



ABSTRACT

The aim of the "Nuclear Excitations by Lasers" group is to study the properties of the nucleus when it is in astrophysical plasma. Two complementary approaches are currently being studied. The first aims to produce hot and dense plasma (~ 400 eV temperature, 10^{-2} g / cm³ density) and to study the nuclear excitation and de-excitation processes that occur inside. A nanosecond and kilo Joule power laser is the ideal tool for producing such plasmas. We expect, for example, to excite numerous ²⁰¹Hg nuclei by NEET process and to observe changes in the apparent lifetime of ^{84m}Rb as a function of plasma temperature. The second approach consists in producing ultra intense bunches of particles electrons, photons, ions, neutrons of a few MeV ($\sim 10^{12}$ particles produced over $\sim 10^{-12}$ s) with a laser-plasma accelerator, so as to produce nuclei with short lifetimes and/or in excited states in plasma or in solid targets for subsequent nuclear reactions of interest.

RÉSUMÉ

L'objectif du groupe Excitations Nucléaires par Lasers est d'étudier le noyau lorsque ce dernier se trouve dans un plasma de type astrophysique. Deux approches complémentaires sont actuellement étudiées. La première vise à produire un plasma chaud et dense (~ 400 eV de température, 10^{-2} g/cm³ de densité) et à étudier les processus d'excitations et de désexcitations nucléaires qui s'y produisent. Un laser de puissance nanoseconde et kilo Joule est l'outil idéal pour produire de tels plasmas. On s'attend par exemple à exciter par effet NEET un grand nombre de noyaux de ²⁰¹Hg et à observer des modifications du temps de vie apparent du ^{84m}Rb en fonction de la température du plasma. La deuxième approche consiste à produire par interaction laser-plasma, des paquets de particules (électrons, photons, ions, neutrons) de quelques MeV et ultra intenses ($\sim 10^{12}$ particules produites sur $\sim 10^{-12}$ s) pour produire des noyaux de courte durée de vie et/ou dans des états excités soit dans un plasma ou dans des cibles solides qui seront utilisées pour y induire des réactions nucléaires d'intérêt.

PERMANENTS

Jocelyn DOMANGE
Franck GOBET
Fazia HANNACHI
Medhi TARISIEN
Maud VERSTEEGEN

POST-DOCTORANTS

Thomas BONNET
Hugo FAURE
Jose-Luis HÉNARÈS

DOCTORANTS

Xavier RAYMOND
Pilar PUYUE-
LO-VALDES
Emmanuel ATUKPOR

COLLABORATIONS

Université Paris Sorbonne, Ecole Polytechnique, CNRS, LULI, France

Université Paris Saclay, CEA, CNRS, LIDYL, France

CEA DAM DPTA, France

Université de Bordeaux, CEA, CNRS, CELIA, France

Université de Bordeaux, Institut Bergonié

Helmholtz Zentrum, GSI, Allemagne

IFIN-HH, Roumanie

Le groupe Excitations Nucléaires par Lasers (ENL) du CENBG a derrière lui une longue tradition d'étude des interactions entre le noyau atomique et son cortège électronique. C'est au sein du groupe qu'à la fin des années 90, a été découvert le processus de bound Internal Conversion (BIC) dans lequel un noyau excité perd son excédent d'énergie en déplaçant un électron présent sur une orbitale atomique interne vers une orbitale d'énergie plus élevée ^[1]. C'est donc tout naturellement que le groupe s'est intéressé aux processus d'excitations nucléaires impliquant le cortège électronique. Ces processus sont significatifs dans un plasma chaud et dense ^[2]. Le laser de puissance s'est alors imposé comme un outil incontournable pour créer ce milieu extrême caractérisé par des degrés d'ionisation et des températures élevés (plusieurs centaines d'eV) et où règnent des champs électriques et magnétiques colossaux (plusieurs milliards de V/m et plusieurs centaines de Teslas). Par ailleurs le laser de puissance permet aussi d'accélérer des particules. Le groupe ENL a établi très tôt des collaborations avec les équipes en pointe dans ce domaine et a participé aux premières expériences françaises d'accélération d'électrons par laser intense ^[3]. Les accélérateurs de particules traditionnels n'ont pas les caractéristiques requises en termes de flux de particules et de synchronisme avec des cibles plasmas pour pouvoir induire des réactions nucléaires dans ce milieu ionisé, a contrario des accélérateurs laser-plasma qui ouvrent ainsi la voie aux études expérimentales de physique nucléaire en environnements extrêmes (hautes températures et hauts champs). Ces accélérateurs laser-plasma sont des objets de recherche et n'ont pas encore atteint la maturité qui permettrait à des expérimentateurs de les utiliser sans connaître la complexité des processus qui s'y produisent. C'est pourquoi un axe de recherche du groupe ENL est l'accélération laser-plasma pour dimensionner un accélérateur que nous utiliserons dans le futur, entre autres, pour nos études de physique nucléaire en milieu plasma.

Ce rapport d'activité couvrant la période 2014-2019 présente nos avancées sur les sources de particules produites avec un laser, l'état de nos recherches concernant les excitations nucléaires dans des plasmas chauds et denses, ainsi qu'un point sur l'instrumentation spécifique qui doit être développée pour pouvoir fonctionner dans l'ambiance très perturbée des lasers de puissance.

ACCÉLÉRATION D'IONS JUSQU'À PLUSIEURS MeV
PAR INTERACTION D'UN LASER DE PUISSANCE AVEC
UN JET DE GAZ DENSE

DIMENSIONNEMENT D'EXPÉRIENCES D'EXCITATIONS
NUCLÉAIRES DANS DES PLASMAS (^{84m}Rb ET ^{201}Hg)

EXTRACTION DE 10^{14} ÉLECTRONS DE QUELQUES keV
DE LA SOURCE SPEEP

DIMINUTION D'UN ORDRE DE GRANDEUR DE LA DURÉE
DE RÉCUPÉRATION D'UN SCINTILLATEUR PERTURBÉ
LORS D'UN TIR LASER

1 Développement d'une source pulsée d'électrons extraits d'un plasma : SPEEP

Motivations

Le groupe ENL a développé entre 2015 et 2018 une source d'électrons intense et de basse énergie, afin de caractériser le processus de diffusion inélastique d'électrons, dans le contexte de l'étude des processus d'excitation nucléaire dans les plasmas chauds et denses. Ce processus est en effet bien connu aux énergies relativistes ^[4], mais les modèles divergent de plusieurs ordres de grandeurs aux énergies d'intérêt dans les plasmas, à savoir entre quelques keV et quelques dizaines de keV ^[5, 6]. La description de la fonction d'onde de l'électron incident et sa déformation lors de la traversée du cortège pour atteindre le noyau, impacte significativement les calculs de section efficace d'excitation.

Aucune donnée expérimentale ne permet à ce jour de discriminer les modèles, c'est pourquoi le groupe s'est lancé dans le développement d'un faisceau d'électrons suffisamment intense pour effectuer des mesures de taux d'excitation et ainsi apporter de nouvelles contraintes aux modèles. Le dimensionnement de cette source est basé sur le cas du noyau de ¹⁸¹Ta, pour lequel plusieurs calculs de section efficace d'excitation existent aux énergies qui nous intéressent et qui a déjà fait l'objet d'études expérimentales au sein des plasmas ^[7, 8]. Le ¹⁸¹Ta présente un premier état excité isomérique, à 6.2 keV, de 6.05 μ s de durée de vie. Au sein d'un plasma, cet état peut être excité par photoexcitation ou par diffusion inélastique d'électrons. La section efficace d'excitation par diffusion inélastique calculée la plus pessimiste est de l'ordre de 2×10^{-33} cm² à 50 keV. Afin de mesurer une centaine de photons de désexcitation et de pouvoir construire une courbe de décroissance, il faut irradier un échantillon de Ta avec plus de 10^{17} électrons incidents. Cette estimation tient compte du coefficient de conversion interne de la transition nucléaire impliquée et d'une efficacité de détection de 25%. Ces 10^{17} électrons peuvent être répartis dans $\sim 10^3$ paquets de $\sim 10^{14}$ électrons, pourvu que la durée d'un paquet soit inférieure à 1/10 de la durée de vie et que le temps entre deux paquets soit supérieur à ~ 10 fois la durée de vie. Les phases d'excitation et de désexcitation sont ainsi décorrélées, et tous les noyaux excités auront eu le temps de décroître avant l'irradiation suivante. Une source d'électrons délivrant $\sim 10^{14}$ électrons sur quelques centaines de ns, et ayant un taux de répétition de l'ordre de 0.1 Hz, permettrait ainsi d'effectuer une mesure de taux d'excitation en quelques jours.

Par ailleurs, une telle source présente un autre intérêt pour le groupe, dans le cadre de ses activités de développement de systèmes innovants de détection en environnement bruité. La détection en ambiance laser est en effet un défi en soi, et une source intense et pulsée d'électrons disponible localement devient un outil idéal pour tout développement et test de nouveaux systèmes de détection.

Le démonstrateur à 5 keV

Pour atteindre les intensités élevées nécessaires à la mesure, les électrons sont extraits d'un plasma chaud créé par un laser focalisé à $\sim 10^{13}$ W cm⁻² sur une cible d'aluminium solide, comme illustré sur la **figure 1**. Un tel plasma constitue en effet un réservoir pratiquement infini d'électrons ^[9]. Les électrons libérés dans ce plasma en sont extraits tout au long de son expansion par un champ électrique. Ce champ est généré en appliquant un potentiel négatif à la cible et en plaçant une grille à la masse à 5 cm de celle-ci. Les paquets d'électrons ainsi extraits et accélérés sont disponibles en aval de la grille, où une Faraday

Cup (FC) a permis d'en caractériser les distributions en énergie et surfacique.

Le dispositif expérimental de la source se compose d'un laser Nd : YAG délivrant des impulsions de 1 J durant 9 ns, focalisé à l'aide d'une lentille traitée sur une cible d'aluminium au centre d'une chambre sous vide contenant aussi la FC. Les distributions en énergie des paquets mesurées à l'aide de la FC sont continues, entre 0 et un peu plus de 5 keV, lorsque -5 kV sont appliqués à la cible. En revanche, les distributions en énergie des électrons extraits à un instant donné après le tir laser sont piquées, avec une valeur moyenne qui décroît à mesure que le plasma se détend. Cette observation a été parfaitement comprise et expliquée à l'aide de simulations *Particle In Cell* (PIC) ^[10]. Celles-ci montrent que les électrons sont extraits d'une cathode plasma en mouvement, correspondant au front avant du plasma. La valeur du champ électrique pertinente pour l'extraction est celle fixée par la différence de potentiel entre cette cathode et la grille (anode). Or, les calculs montrent que le potentiel de cette cathode n'est pas égal à celui appliqué à la cible, du fait de l'expansion du front arrière du plasma. L'accord entre les énergies moyennes des électrons extraits calculées et mesurées en fonction du temps après le tir laser est illustré sur la **figure 2**.

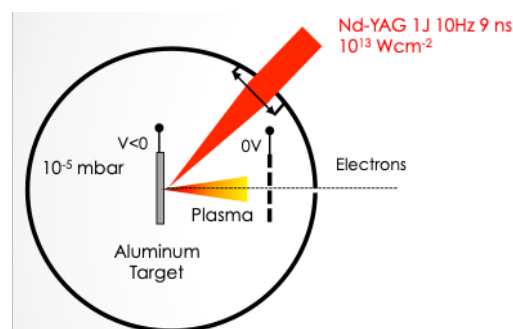


FIGURE 1 Principe de la source SPEEP

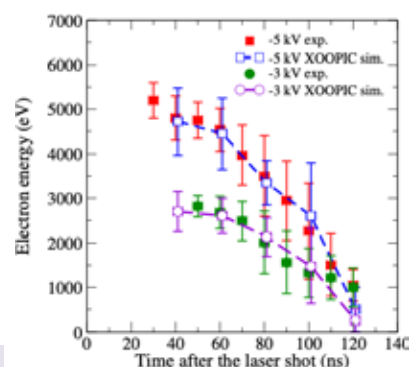


FIGURE 2 Excellent accord entre les énergies moyennes des électrons extraits mesurées et calculées à un instant donné ^[10]

Les distributions surfaciques également mesurées montrent que l'extraction s'effectue préférentiellement le long de l'axe perpendiculaire à la cible, passant par le point d'interaction du laser (en pointillés sur la [figure 1](#)). Cet axe est également un axe de symétrie cylindrique des distributions ^[11]. Par ailleurs, un préplasma anisotrope et de faible densité, composé d'ions positifs, est observé au niveau de la grille avant l'arrivée des premiers électrons. Il est formé par les contaminants hydrogénés toujours présents sur la surface des cibles laser (eau, graisse...). Les distributions surfaciques sont reproduites par les calculs PIC, en tenant compte de ce préplasma ^[10]. Les calculs montrent même le rôle primordial qu'il joue sur l'extraction : il fixe le nombre d'électrons extraits et la forme de la distribution surfacique. En effet, il affecte la carte de champ dans la zone d'extraction, en créant une zone d'accélération et de décélération. La réduction de la zone d'accélération entraîne une augmentation du champ extracteur et donc du nombre d'électrons extraits. Dans cette configuration, la source d'électrons délivre des paquets de 4×10^3 électrons, d'une durée de ~ 130 ns, correspondant à un courant maximal de 125 A.

Upgrade à 30 keV

Le succès du démonstrateur à 5 keV, tant sur le principe de la source que sur la compréhension de son fonctionnement, a permis d'engager l'évolution du dispositif pour produire des faisceaux jusqu'à 30 keV. L'ensemble de l'étage de polarisation de la cible a été modifié afin de supporter des hautes tensions appliquées de plusieurs dizaines de kV, ainsi que les exceptionnels appels de courant attendus. Les propriétés des paquets d'électrons obtenus, en termes de distributions en énergie et surfacique, vérifient les comportements attendus, déduits des observations à -5 kV. Une impulsion de plus de 600 A crête est délivrée par la source, correspondant à $\sim 9 \times 10^3$ électrons dans un paquet de 135 ns ^[12]. Les distributions en énergie restent continues, ce qui caractérise cette source, jusqu'à 35 keV lorsque 30 kV sont appliqués à la cible. Ce phénomène, déjà observé à -5 kV, est également parfaitement compris : les premiers électrons extraits sont accélérés par le champ extracteur, mais bénéficient également d'une "poussée" supplémentaire due aux électrons suivants. On observe enfin la saturation du nombre d'électrons extraits à un peu moins de 10^4 électrons par paquet lorsque la tension appliquée à la cible augmente ([figure 3](#)), ce qui correspond au fait que la charge maximale du préplasma est atteinte.

Bilan et perspectives

Le projet de développement de la source d'électrons s'est achevé, avec l'obtention d'un faisceau pulsé dont les caractéristiques peuvent permettre des mesures de taux d'excitation par diffusion inélastique d'électrons nécessaires pour contraindre les modèles. Pour cela, les propriétés de la source ont été parfaitement caractérisées, d'un point de vue expérimental et théorique. Elles doivent être introduites dans un dimensionnement précis d'une expérience de mesure de taux d'excitation du premier état isomérique du ^{181}Ta . La contribution du processus concurrent de photoexcitation ainsi que le nombre de produits de désexcitation attendus, électrons de conversion et photon γ , doivent être quantifiés afin d'optimiser le système de détection. Une simulation Monte Carlo est en cours.

Des études ont par ailleurs été menées pour l'utilisation de la source à d'autres applications. En particulier, elle présente un fort intérêt pour les études de vieillissement des composants électroniques soumis à de fortes doses ^[11]. La source permet en effet de délivrer 15 kGray en moyenne par tir laser, avec la possibilité de faire varier la profondeur de dépôt entre 100 nm et 2 μm . Cette versatilité permet d'envisager des études systématiques de vieillissement sans la difficulté des contraintes liées à la radioprotection associées aux doses aussi élevées. Des premiers tests de conversion des électrons en faisceau d'X ont également été menés afin de caractériser l'irradiateur

ainsi obtenu. Celui-ci pourrait aussi permettre des études systématiques de taux de fragmentation de brins d'ADN soumis à de fortes doses de rayonnement X par exemple.

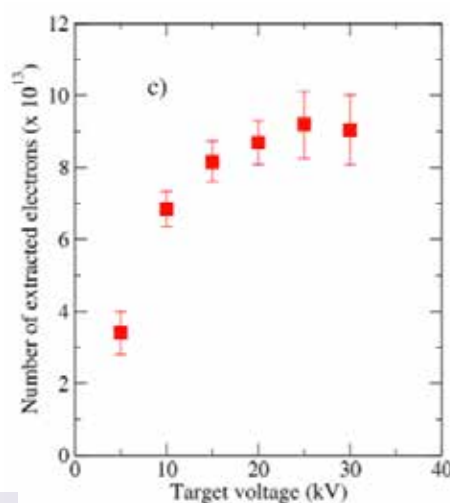


FIGURE 3

Nombre d'électrons par paquet ^[12]

2 Développement d'un accélérateur laser-plasma d'ions à partir d'un jet de gaz dense

Motivations

L'interaction d'un laser de très haute intensité avec une cible gazeuse ou solide produit des faisceaux d'ions et d'électrons de plusieurs MeV d'énergie qui peuvent être convertis en sources secondaires compactes de rayons X et de neutrons. Les caractéristiques des faisceaux d'ions accélérés par laser (énergie maximale, dispersion en énergie, divergence et intensité du faisceau) dépendent des mécanismes à l'origine de l'accélération des ions lors de l'interaction du laser avec la cible. La mise sur le marché de lasers à haut taux de répétition a entraîné les premières recherches sur l'accélération d'ions à partir de jets de gaz denses ou de cibles liquides car celles-ci ont l'avantage de générer peu de débris et d'être facilement régénérées à chaque tir.

En 2011, D. Haberberger et al ont accéléré un paquet de protons "quasi monoénergétique" de 20 MeV en faisant interagir le pulse principal de $6.5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ d'un laser CO_2 de longueur d'onde $\lambda_l = 10 \mu\text{m}$ avec un jet de gaz de densité supérieure à la densité critique (densité au-delà de laquelle le gaz est opaque au laser) $n_c = 1.1 \times 10^{29} \text{ cm}^{-3}$ ^[13]. Les auteurs ont invoqué le processus d'accélération par onde de choc électrostatique (CSA) pour expliquer leurs résultats en s'appuyant sur des simulations du code PIC-2D OSIRIS. Ces résultats ont encouragé plusieurs équipes à s'intéresser au problème de l'accélération d'ions par CSA avec des lasers Ti : Saphir qui pour le moment sont les seuls à pouvoir atteindre des intensités ultra relativistes. La difficulté est que ces lasers de longueur d'onde $\lambda_l = 0.8 \mu\text{m}$ ont une densité critique élevée ($n_c = 1.74 \times 10^{21} \text{ électrons/cm}^3$) ce qui nécessite de réaliser des jets de gaz alimentés par des pressions de plusieurs centaines de bars. En 2013, F. Sylla et al ont mené une expérience avec le laser "salle jaune" du LOA en utilisant un jet supersonique submillimétrique d'hélium issu d'une buse conique avec une densité de $0.95 n_c$ ^[14]. Ils ont accéléré des ions He^+ jusqu'à 250 keV transversalement à la direction du faisceau laser. En 2017, Chen et al., sur le laser TITAN de Livermore, ont utilisé un jet

supersonique de dihydrogène avec une densité de $2.5n_c$ issu de buses rectangulaires et ont observé des protons avec des énergies jusqu'à 0.6 MeV émis dans la direction du faisceau laser ^[15].

Ces dernières années (depuis 2017), nous avons travaillé d'une part à la mise au point de cibles de jets de gaz supersoniques de hautes densités (proches de la densité critique) et d'autre part à l'étude des mécanismes d'accélération avec de telles cibles. Les jets de gaz que nous avons conçus ont ensuite été utilisés au cours de deux campagnes d'expériences en 2018.

Génération de jets de gaz denses

Le système que nous avons développé au CENBG est basé sur un booster (tous gaz) de marque "Haskel" délivrant jusqu'à 1000 bars, associé à une électrovanne rapide "Clark-Cooper" reliée à une buse dont la géométrie permet de définir les caractéristiques (densité, profil) du jet de gaz (*figure 4*). Le groupe ENL a développé une variété de géométries de buses pour permettre de générer différents profils de densité.



FIGURE 4

Système de jet de gaz du CENBG. (a) Booster et (b) électrovanne avec une buse supersonique.

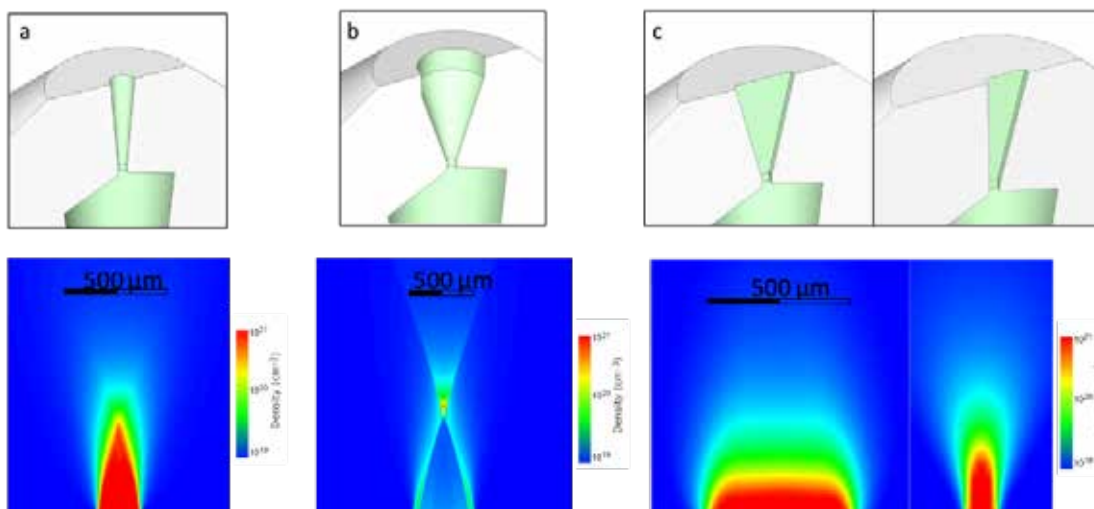
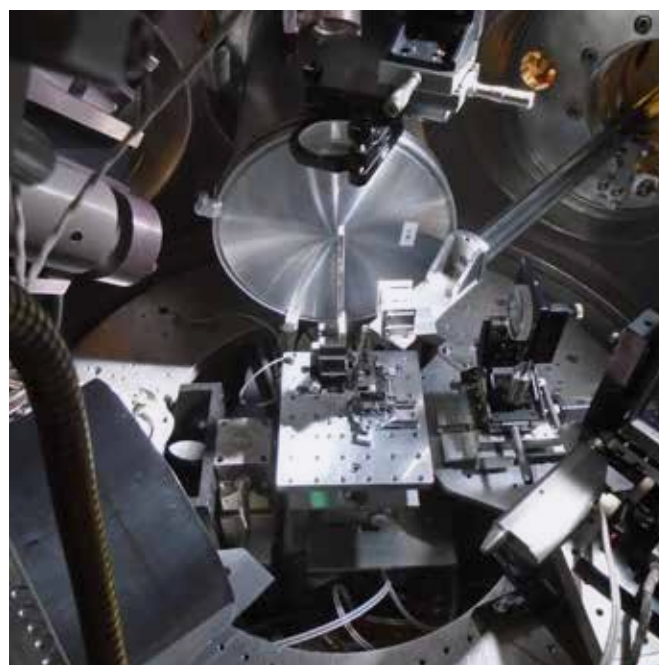


FIGURE 5

Coupe du modèle 3D pour la (a) buse conique, (b) buse à choc et (c) buse asymétrique. En bas sont montrées les distributions spatiales de densités du jet de gaz formées à la sortie des buses.

Un banc de test a été construit au laboratoire pour caractériser les buses supersoniques. Les profils de densité réels des buses ont été mesurés pour différents gaz avec un interféromètre Mach-Zehnder ce qui a permis de valider les simulations FLUENT. Le déphasage entre une partie d'un faisceau laser HeNe qui traverse le jet de gaz et une autre se propageant à l'extérieur de ce dernier produit, quand les deux faisceaux sont recombinaisonnés une figure d'interférence qui est mesurée. Le profil de densité du jet de gaz est reconstruit à partir de ce déphasage par inversion d'Abel, idoine pour ce système présentant une symétrie cylindrique. Dans le cas de buses non-symétriques la reconstruction tomographique est possible à partir de plusieurs images de déphasage à différents angles. La comparaison entre les profils de densité simulés et mesurés donne une très bonne concordance, comme le montre la **figure 6**.

La dynamique du flux de gaz a été étudiée pour déclencher l'interaction du laser avec la cible gazeuse au maximum de sa densité et limiter la quantité de gaz relâchée dans l'enceinte sous vide. L'évolution du flux de gaz est mesurée par strioscopie (technique basée sur l'effet Schlieren). Dans ce processus optique, la lumière diffusée par un l'objet est filtrée par un obstacle qui bloque le mode de Gauss et permet de mesurer seulement la lumière diffractée. Cette méthode permet de définir précisément l'instant où le débit de gaz de la buse est stabilisé pour différents gaz, pressions et temps d'ouverture de l'électrovanne. La **figure 7** présente l'évolution de la densité du jet de gaz au cours du temps après l'ouverture de l'électrovanne ($t=0$ ms).

Expériences et simulations d'accélération d'ions par interaction laser-jet de gaz

Dans le cadre d'une collaboration (CENBG, LULI, CELIA et LIDYL) nous avons utilisé nos buses supersoniques au cours de deux expériences sur l'installation PICO2000 en février puis en juillet 2018. Lors de ces expériences nous avons accéléré pour

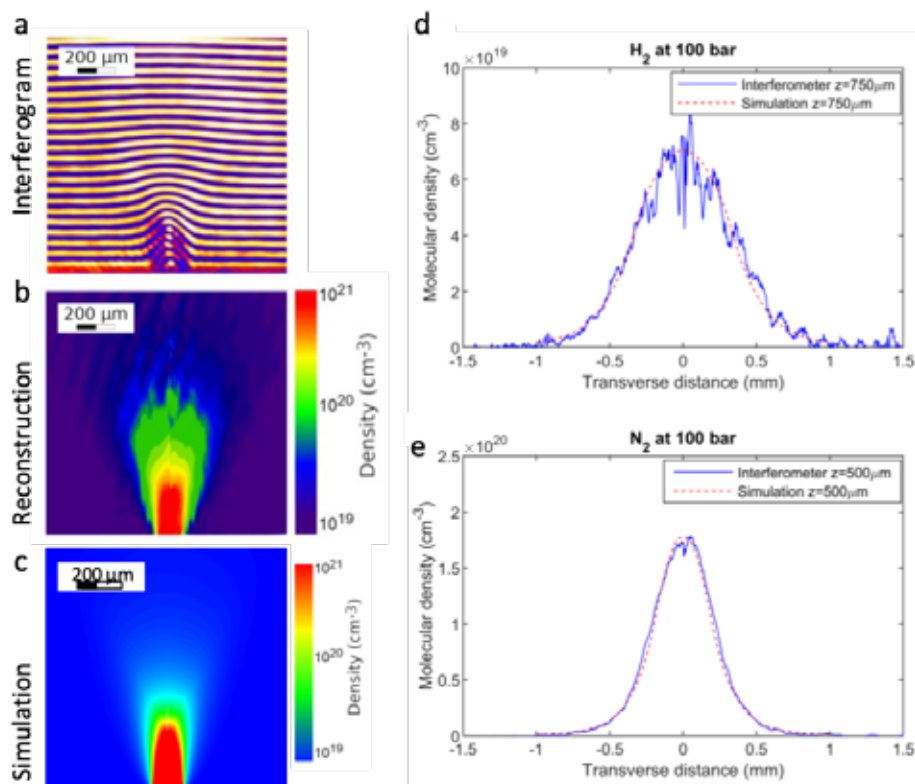
la première fois lors d'un tir, jusqu'à 10^{12} protons atteignant des énergies maximales de ~ 5 MeV ^[18], ainsi que des ions hélium jusqu'à des énergies maximales de 15 MeV ^[19].

Le laser PICO2000, de $1.052 \mu\text{m}$ de longueur d'onde, délivre toutes les heures une impulsion de 60 J de durée 1 ps focalisée sur une tache focale de $12 \mu\text{m}$ de diamètre. L'intensité ainsi obtenue est de $\sim 5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$. Le contraste du laser (rapport de l'intensité du laser présente avant l'impulsion principale, sur l'intensité pic de cette dernière) n'était que de 10^{-6} , 500 ps avant l'arrivée du pulse principal. Une impulsion de longue durée générée par l'ASE (Amplified Spontaneous Emission), ici de $\sim 5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ d'intensité, était ainsi déjà présente sur la cible 500 ps avant l'arrivée de l'impulsion principale.

Quatre paraboles de Thomson de $100 \mu\text{m}$ de diamètre d'ouverture, équipées chacune d'une imaging plate (IP) ^[20] et placées à 50 cm du point de focalisation du laser, permettaient de mesurer les spectres en énergie des ions qui y entraient. Un spectre typique des énergies de protons obtenues avec le laser focalisé sur le bord du jet supersonique de $150 \mu\text{m}$ de diamètre (FWHM) est présenté **figure 8**.

Les spectres mesurés ont été reproduits par des simulations utilisant conjointement le code hydrodynamique FLASH et le code PIC-2D PICLS. Le code hydrodynamique, mis en œuvre par un collègue du CELIA, a permis de calculer le véritable profil de densité de la cible gazeuse vu par l'impulsion principale. En effet, le jet supersonique tel qu'il avait été mesuré au CENBG a été fortement modifié par la présence de l'ASE du laser. Sa densité maximale a été multipliée par un facteur ~ 2.5 , son profil s'est fortement raidi et sa largeur a été diminuée de moitié (**figure 9**).

Ce profil de densité réaliste a été entré dans le code PIC nommé PICLS pour reproduire l'interaction de la cible modifiée avec l'impulsion laser principale picoseconde. Ces simulations menées par le CENBG avec le soutien du CELIA ont permis d'obtenir les résultats présentés **figure 10**.



(a) Image d'interférométrie avec le déphasage produit par le jet de gaz. (b) reconstruction avec l'inversion d'Abel. (c) Simulation FLUENT du même jet de gaz. Comparaison des résultats de simulation avec des reconstructions interférométriques pour (d) 100 bar de dihydrogène à $Z = 750 \mu\text{m}$ et (e) 100 bar de diazote à $Z = 500 \mu\text{m}$. Aucun paramètre "de concordance" entre mesures et simulations n'a été ajusté

FIGURE 6

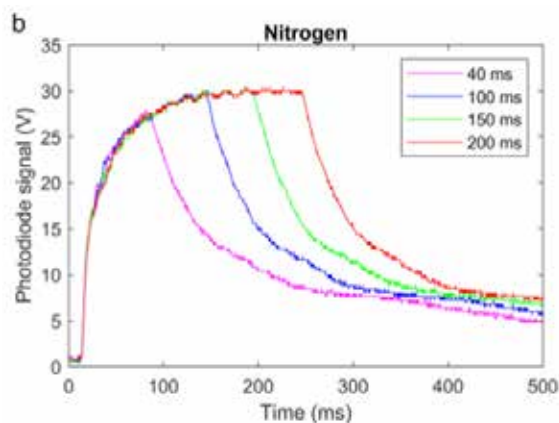


FIGURE 7

Evolution de la densité du jet de diazote sous 1kbar, en fonction du temps pour différentes durées d'ouverture de l'électrovanne. La densité du gaz est proportionnelle au signal lumineux enregistré sur la photodiode. Environ 12 ms sont nécessaires au gaz pour parcourir la distance séparant l'électrovanne de la sortie de la buse. Après la fermeture de l'électrovanne, il faut plusieurs centaines de millisecondes pour vider le réservoir de la buse. Lorsque la densité maximale du jet de gaz est atteinte le signal reçu présente un plateau.

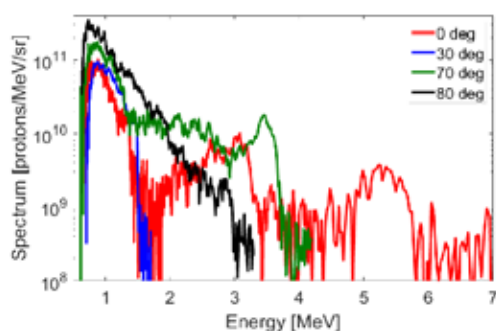


FIGURE 8

Spectres en énergie des protons mesurés à 0° (rouge), 30° (Bleu), 70° (vert) et 80° (noir) obtenus sur l'installation PICO2000 quand le laser est focalisé sur le front montant du profil de densité du jet supersonique.

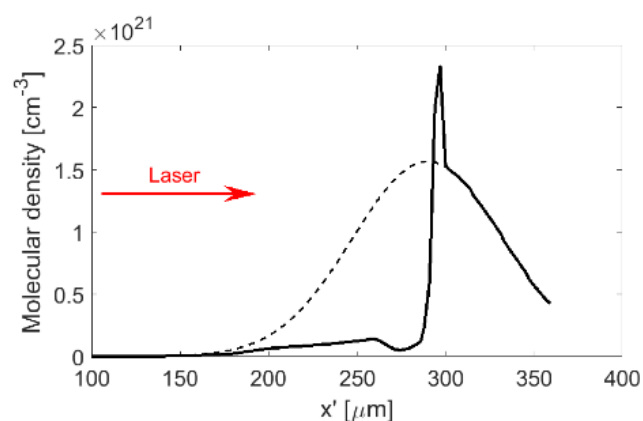


FIGURE 9

Résultat du code FLASH simulant l'effet de l'interaction de l'ASE de PICO2000 sur le jet de gaz. Les pointillés représentent le profil de densité initial de la cible. Le profil de densité en trait plein est la cible déformée par 500 ps d'ASE d'intensité 5×10^{13} W/cm² vue par l'impulsion principale (visualisée en rouge)

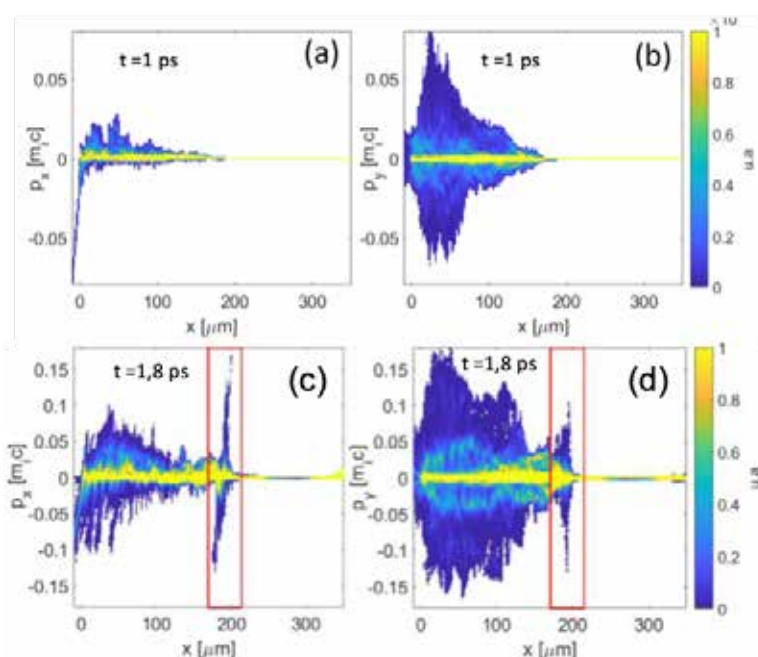


FIGURE 10

Diagrammes de phase P_x , (impulsion des protons selon l'axe de propagation du laser x), en fonction de la position x (a et c) et P_y , (impulsion des protons selon l'axe transverse Y), en fonction de x (b et d). Les diagrammes ont été tracés à deux instants différents : à $t=1$ ps, juste avant que l'impulsion laser n'arrive dans la zone surcritique du jet située un peu avant $x=200 \mu\text{m}$ (a et b) et juste après l'arrivée de l'impulsion sur la zone surcritique à $t=1.8$ ps (c et d).

Lorsque l'impulsion laser se propage dans la zone peu dense du plasma (*figure 10 a et b*), des protons sont mis en mouvement sur son passage. On remarque que les quantités de mouvement acquises selon l'axe transverse à la propagation du laser (axe y) sont plus grandes que celles suivant l'axe de propagation du laser (axe x). C'est le même processus que celui observé par F. Sylla et al [13] dans la zone de densité sous critique. Cela explique pourquoi autant d'ions sont observés expérimentalement aux angles >60 degrés sur la *figure 8*. Puis lorsque le pulse laser arrive dans la zone très dense du plasma, le piston créé par la pression de radiation du laser se met à l'œuvre et accélère les protons (via les électrons non représentés). Cette fois-ci les protons sont préférentiellement accélérés dans la direction longitudinale du faisceau jusqu'à des impulsions de 0.17 m_c , ce qui représente des vitesses de l'ordre $5.1 \times 10^7\text{ m/s}$. A partir de ces simulations il est alors possible de construire un spectre des énergies cinétiques des protons observés aux angles où nous avions placé des détecteurs lors de l'expérience. Les résultats de la simulation sont présentés *figure 11*. Globalement les formes des spectres à chaque angle sont bien reproduites. Les valeurs des énergies cinétiques sont plus élevées que celles mesurées, mais il est bien connu que les énergies prédites à l'aide de simulations 2D sont en général surévaluées.

Ces simulations nous ont aussi montré que les conditions d'intensité laser et de profil de densité du jet de gaz propices au processus d'accélération CSA n'étaient pas réunies lors de ces premières expériences sur le LULI2000 et que seule la pression de radiation du laser a accéléré les ions. Nous avons obtenu du temps de faisceau sur l'installation laser PHELIX du GSI de Darmstadt pour mener en 2020 une expérience d'accélération d'ions à partir d'un jet de gaz dont la forme aura été préalablement sculptée par l'intermédiaire d'une pré-impulsion nanoseconde contrôlée. Le contraste élevé du laser PHELIX (10^{11}) associé au profil de densité idoine de la cible devrait pouvoir favoriser l'apparition du processus CSA recherché.

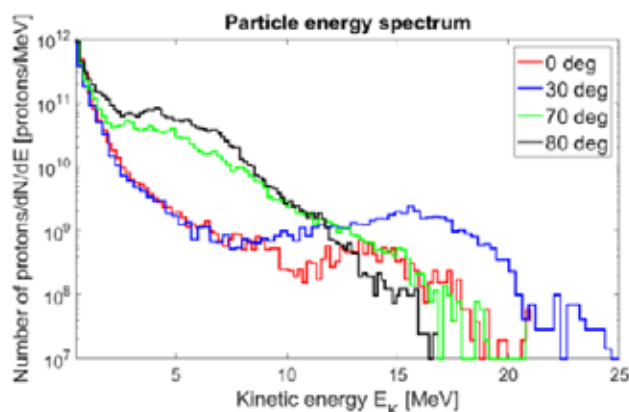


FIGURE 11

Spectres simulés d'énergies cinétiques de protons émis aux mêmes 4 angles que les spectres expérimentaux de la figure 8.

2

EXCITATIONS NUCLÉAIRES DANS LES PLASMAS

En parallèle avec le développement d'un accélérateur laser plasma qui permettra d'obtenir des paquets d'ions ultra intenses délivrés de manière stable et contrôlée dans la durée, il est possible dès aujourd'hui de créer des plasmas chauds et denses par interaction d'un laser de puissance avec une cible solide. Ces plasmas sont des milieux propices aux excitations nucléaires.

Motivations

L'enjeu principal de l'étude des excitations nucléaires dans les plasmas pour la physique fondamentale est d'obtenir des données pour contraindre les modèles qui décrivent les comportements nucléaires dans ce milieu et les rendre plus prédictifs. Il faut préciser nos connaissances des propriétés nucléaires dans ces conditions de densité et de température où elles sont beaucoup extrapolées sans jamais avoir été mesurées. Dans les plasmas stellaires, il est bien connu que les noyaux participant à la nucléosynthèse ne sont pas seulement présents dans leurs états fondamentaux mais aussi dans des états excités. Les excitations/désexcitation nucléaires dans les plasmas peuvent donc avoir une influence directe sur les chaînes de réactions qui composent les cycles stellaires.

Vers une expérience d'excitation du ^{201}Hg

Le noyau ^{201}Hg possède un premier état excité d'énergie 1565 eV avec une demi-vie de 81 ns ^[21]. Dans un système atomique neutre, cet état se désexcite principalement par conversion interne. Une étude théorique basée sur un modèle d'atome moyen amélioré a été menée pour estimer le taux d'excitation nucléaire par effet NEET de cet état dans un plasma de température et densité fixées et à l'équilibre thermodynamique. Les résultats ont été utilisés pour estimer le nombre de noyaux excités que l'on pourrait atteindre lors d'un tir laser de haute énergie ; il atteindrait le million ^[22]. Pour mettre en évidence ces noyaux isomères formés dans le plasma, il faut observer les électrons de conversion de 800 eV émis durant leur désexcitation. Pour cela, il faut être capable de transporter ces noyaux loin du plasma où a eu lieu l'excitation afin d'observer leur désexcitation dans un endroit protégé du bruit de fond électromagnétique inhérent à tout plasma. Un déflecteur électrostatique a été conçu et caractérisé à cet effet. De manière à comprendre le transport des ions, une expérience d'expansion d'un plasma de Ta formé par laser a été menée sur l'installation ELFIE. Cette étude a montré que les ions d'un plasma formé par laser sont mis en mouvement via des processus thermiques et des processus électriques formant deux populations d'ions. Une première couche de quelques dizaines de nano mètres (20-30 nm) se trouve en avant du plasma en expansion dans le vide. Dans cette couche règne un champ électrique qui accélère les ions qui s'y trouvent. La grande majorité des ions restants (99.5%) sont quant à eux seulement accélérés par le mouvement thermique du fluide ^[23]. Les ions qui seront intéressants pour la mise en évidence de l'excitation du ^{201}Hg par effet NEET, sont ceux ayant de hauts états de charge, formés dans la première couche, et capables de "s'extraire" rapidement du plasma avant de capturer des électrons. La durée de vie de ces isomères de hauts états de charges est prédite comme pouvant atteindre quelques millisecondes par inhibition de la conversion interne, ce qui leur permettra de survivre au transport. Sur le million de noyaux de ^{201}Hg excités dans le plasma, seules les désexcitations de 0.5% d'entre eux seront observables.

Estimation du taux d'excitation du $^{84\text{m}}\text{Rb}$ dans un plasma de 400 eV de température

Le $^{84\text{m}}\text{Rb}$ est un noyau qui possède un état isomérique 6^- de 20,6 min de demi-vie situé à 466 keV d'énergie d'excitation. À $\sim 3,5$ keV au-dessus de cet état se trouve un état 5^- de 9 ns de demi-vie vers lequel l'isomère $^{84\text{m}}\text{Rb}$ pourrait être excité principalement par effet NEET dans un plasma ^[24]. Cette excitation provoquerait alors la désexcitation rapide de l'état isomérique initial.

Lors du précédent rapport d'activité nous avons présenté les résultats de nos calculs de taux d'excitations de l'état isomérique lorsque le $^{84\text{m}}\text{Rb}$ était plongé dans un plasma de 270 eV de température à l'équilibre thermodynamique local (ETL). Depuis nous avons estimé aussi le nombre d'excitations de l'état isomérique dans un plasma de 400 eV ETL ^[25]. Ces nouveaux taux d'excitation sont consignés dans le *tableau 1*.

A partir de ceux-ci, nous avons dimensionné une expérience sur

l'installation ELI-NP qui a été incluse dans le TDR ELI-NP [26]. Le principe de l'expérience est exposé sur la **figure 12**. Les noyaux de rubidium 84 excités dans leur état isomérique sont créés par des réactions nucléaires $^{76}\text{Ge}(^{12}\text{C}, p+3n)^{84\text{m}}\text{Rb}$. Les ions carbone sont accélérés pendant une heure par un laser TW à 10Hz de façon analogue à ce qui a été fait sur le laser Astra-Gemini en 2010 [27]. Puis après cette durée de création de noyaux de $^{84\text{m}}\text{Rb}$, dix impulsions lasers ns successives (1/min) de $10^{15}\text{W}/\text{cm}^2$ sont envoyées sur la cible contenant les noyaux d'intérêt. Ceux-ci sont alors excités et libèrent leur énergie en passant par le niveau 5- de 9 ns de demie vie, en émettant deux gammas de 219 et 248 keV.

Avec un tel dispositif, en une heure d'irradiation on pourrait créer 7×10^9 noyaux de $^{84\text{m}}\text{Rb}$ dans une cible de germanium de 3 μm d'épaisseur et provoquer un nombre de désexcitations compris entre 12 et 4.2×10^6 par tir du laser "plasma" [28], si le taux λ_{NEET} réel est dans la fourchette haute de l'estimation.

Pour obtenir la haute température du plasma de plus de 400 eV ETL nous pourrions jouer sur la structure de la cible en la munissant par exemple de micro pilliers [29]. Il est aussi possible d'envisager cette expérience sur l'installation laser ELI-Beamlines de Prague qui rassemble deux types de lasers au sein d'une même chambre d'expérience dans le hall expérimental E3. Le laser Peta Watt L3 (30 J, 30 fs) accélérerait à 10 Hz les ions carbonés et le laser L4 ATON et ses impulsions ns de 1.5 kJ, délivrées à la cadence de 1 tir par minute permettrait de plonger les $^{84\text{m}}\text{Rb}$ dans le plasma de 400 eV.

Température du plasma	$\lambda_{6 \rightarrow 5-} \text{ min}$	$\lambda_{6 \rightarrow 5-} \text{ max}$
270 eV ETL	58.4 s^{-1}	334.4 s^{-1}
400 eV ETL	34.8 s^{-1}	$7.4 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$

TABLEAU 1

Estimation du taux d'excitation du niveau isomérique 6- vers le niveau 5- dans un plasma de 270 eV ou 400 eV. Ces estimations prennent en compte les effet NEET, NEEC, la photoexcitation et la diffusion (e,e')

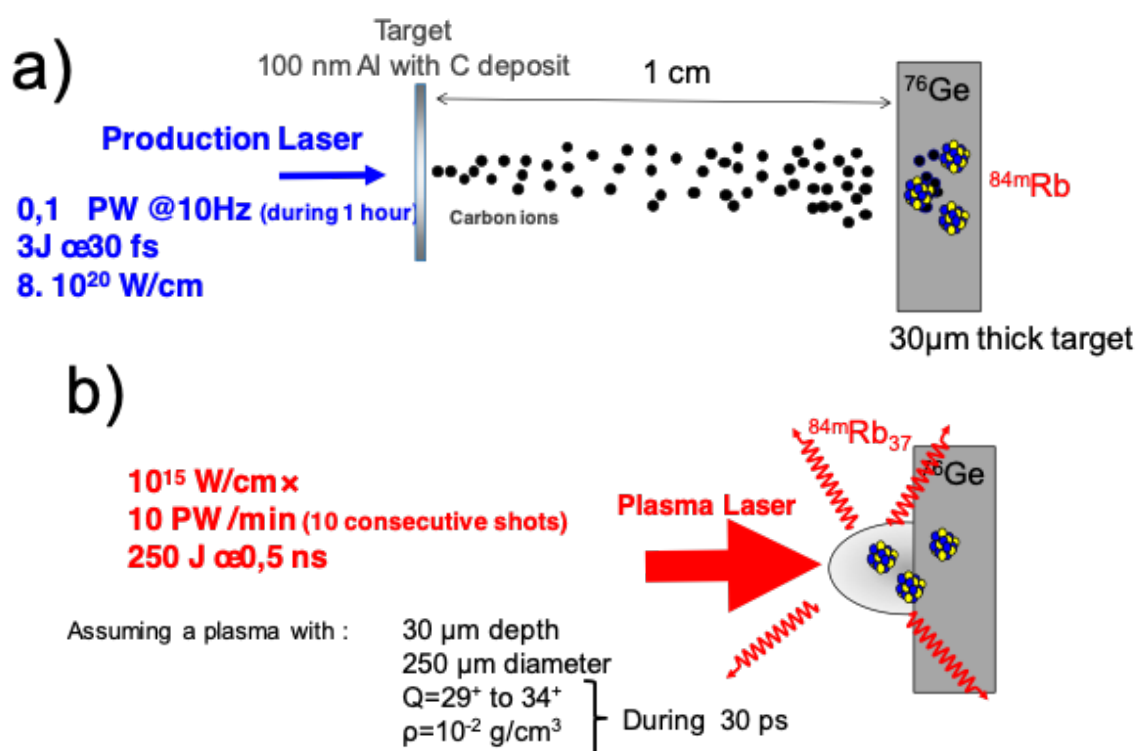
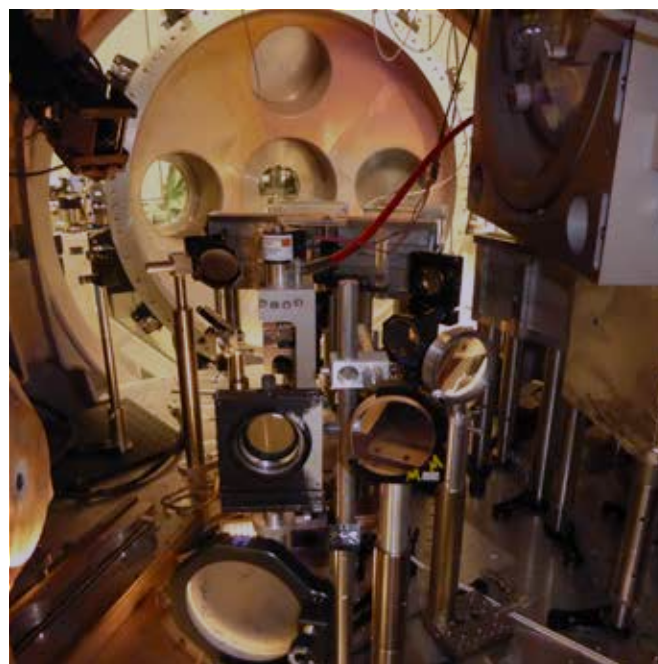


FIGURE 12

Schéma de principe de l'expérience ^{84}Rb .

*a) un faisceau de carbone accéléré par laser à partir d'une cible solide crée des noyaux $^{84\text{m}}\text{Rb}$.
b) Un laser ns crée un plasma dans lequel les $^{84\text{m}}\text{Rb}$ seront excités, entre autres, par effet NEET*

Motivations

L'utilisation de détecteurs électroniques à proximité du point focal d'un laser de puissance n'est pas chose aisée à cause de l'impulsion électromagnétique (EMP) créée, et du flash X émis. C'est pourquoi des détecteurs passifs tels que les Image Plates (IP), les films radio chromiques (RCF) et le CR39 sont utilisés habituellement. Ces détecteurs nécessitent plusieurs minutes entre deux tirs laser pour les remplacer, les lire et les analyser. L'activation nucléaire peut aussi être utilisée pour caractériser des ions, des photons X durs, des électrons et des neutrons [30]. Après le tir laser, les échantillons d'activation sont extraits de la chambre de réaction et leurs activités sont mesurées "ex situ". Cependant, cette mesure de la radioactivité dans un environnement non perturbé situé à bonne distance de la chambre de réaction interdit des mesures tir à tir à hauts taux de répétition (10 Hz). Les détecteurs et leur électronique développés pour des mesures "ex situ" ne peuvent pas être placés tels quels dans la chambre pour y réaliser par exemple des mesures de spectroscopie γ "in situ". En effet le flash X produit lors d'un tir laser d'une centaine de Terawatts dépose une quantité d'énergie supérieure à plusieurs centaines de GeV dans un scintillateur situé à proximité. Les signaux sortant d'un photomultiplicateur accolé au scintillateur ne peuvent pas être traités de façon conventionnelle avec un amplificateur et un convertisseur analogique/numérique de type "peak sensing". Après le flash X, le système est aveugle pendant plusieurs centaines de microsecondes et ne permet pas la mesure de décroissances radioactives de noyaux de durées de vie inférieures à quelques dizaines de μ s.

Réduire le temps de récupération d'un scintillateur

Notre objectif est d'utiliser des scintillateurs "adaptés" capables de résister aux conditions extrêmes présentes lors d'un tir de laser de puissance pour pouvoir faire de la spectroscopie γ quelques centaines de nanosecondes (voire moins) après l'impulsion. Pour cela nous utilisons la nouvelle génération de

photomultiplicateur HPD et numérisons directement les signaux électriques sortis du détecteur. Cette technologie permet de réaliser une spectroscopie γ "in situ".

En octobre 2016 lors d'une expérience sur l'installation ELFIE du LULI, un scintillateur LaBr_3 couplé à une HPD nous a permis de détecter des γ émis par des isomères du ^{90}Nb produits par la réaction $^{90}\text{Zr}(p,n)^{90}\text{Nb}$ lors de l'interaction de protons accélérés par laser avec d'une cible de Zirconium. Le ^{90}Nb possède, entre autres, deux états isomériques de demi-vie de 6.19 ms et 63 μ s émettant des gammas de 257 et 122 keV respectivement. Le signal obtenu grâce à la technologie HPD (Hybrid Photo Detector) est plus maîtrisé (figure 14) que celui que nous avons obtenu lors d'une campagne précédente sur ELFIE en 2014 [31] où nous avons utilisé des tubes photomultiplicateurs (PMT) plus conventionnels (figure 13).

Lors de l'expérience de 2014 nos détecteurs étaient aveuglés pendant plus de 3 ms après le tir laser. Aujourd'hui, nous pouvons mesurer les γ émis par l'état isomérique de 63 μ s de demi-vie, notamment grâce à l'injection de pulses lumineux calibrés toutes les 10 μ s qui nous servent de référence pour corriger lors de l'analyse, les fluctuations de gain du détecteur (figure 14).

Même en utilisant une HPD, lorsqu'on regarde la figure 14, on observe un fort signal exponentiel décroissant aux instants proches du tir laser. Il faut au détecteur environ 40 μ s pour que les premiers signaux γ se superposent à ce fond. Pour déterminer qui du scintillateur ou de la HPD impose cette longue durée de recouvrement, nous avons éclairé directement la HPD avec un laser de 6 ns de durée, et une densité de puissance correspondante à celle émise par un cristal LaBr_3 soumis au flash X lors d'un tir laser. Ce test nous a permis de prouver que le long signal décroissant sur la figure 13 n'est pas du au photodétecteur, mais au scintillateur qui émet de la lumière par le processus de rémanence ("afterglow") pendant des dizaines de microsecondes [32]. Nous espérons d'ici un à deux ans faire encore reculer la durée de recouvrement du détecteur actuelle de ~ 40 μ s à quelques dizaines de nanosecondes en filtrant les longueurs d'ondes émises sur de longues durées lors du processus de rémanence. En collaboration avec les services électronique et instrumentation du CENBG nous avons développé des amplificateurs transimpédance de gain 10^3 avec 1 GHz de bande passante. En outre pour utiliser des

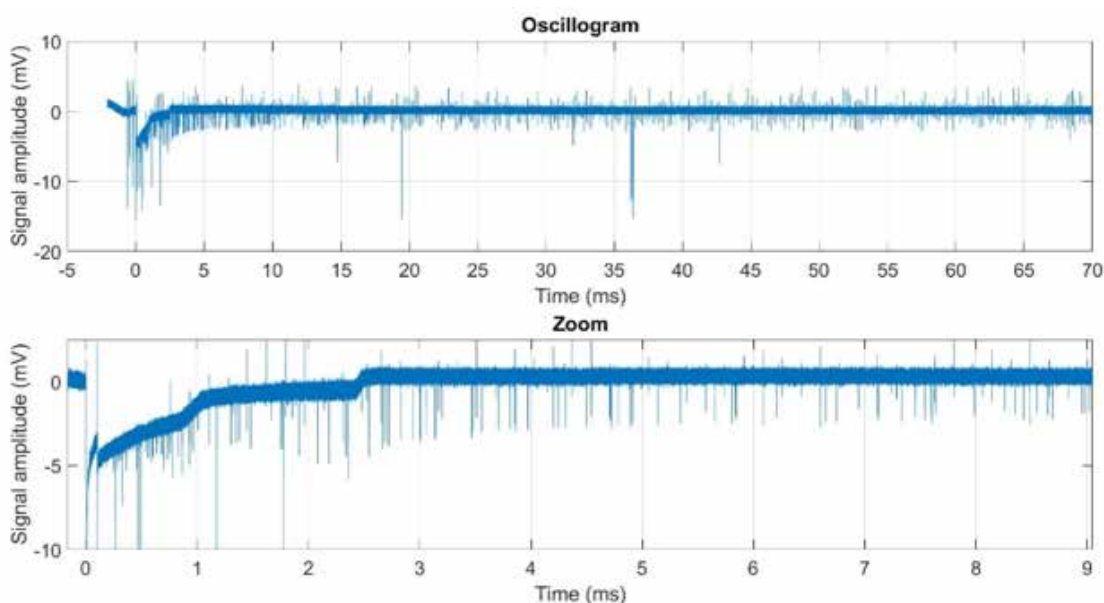


FIGURE 13

Signal issu d'un scintillateur LaBr_3 couplé à un PMT lors de l'irradiation d'une cible de Zr par des protons accélérés par le laser ELFIE en 2014 [27]. La spectroscopie γ est impossible durant 3 ms après le pulse laser. L'instant $t=0$ correspond au tir laser.

diodes à avalanche (APD) comme possible alternative aux HPD, nous travaillons sur un système d'amplificateurs cascades de gain 10^6 avec 1 GHz de bande passante, ce qui représente un véritable défi technologique. Par ailleurs un traitement des signaux numérisés basé sur l'algorithme de Jordanov^[33] est en cours de développement au sein du groupe ENL de manière à construire les spectres en énergie des γ détectés au cours du temps. Ces spectres énergie-temps permettront d'identifier et de dénombrer les désexcitations d'états isomériques ou la radioactivité de radio-isotopes formés à la suite d'un tir laser. Cette spectroscopie en conditions difficiles est un verrou technologique qui une fois levé ouvrira la voie à l'étude du noyau en milieu extrême (plasma chaud et dense avec de forts champs électromagnétiques) et à l'étude des réactions nucléaires sur des noyaux instables (radioactifs et/ou excités).

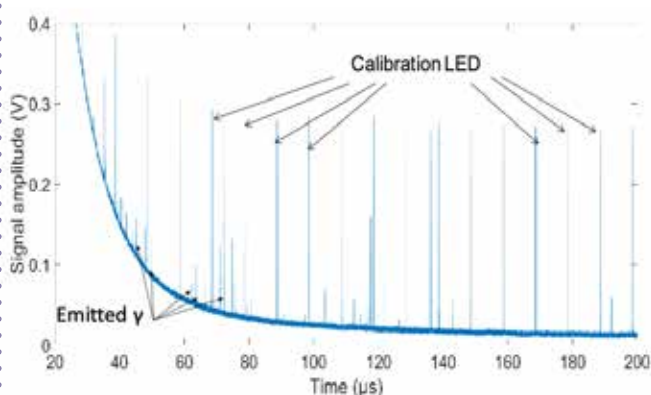


FIGURE 14

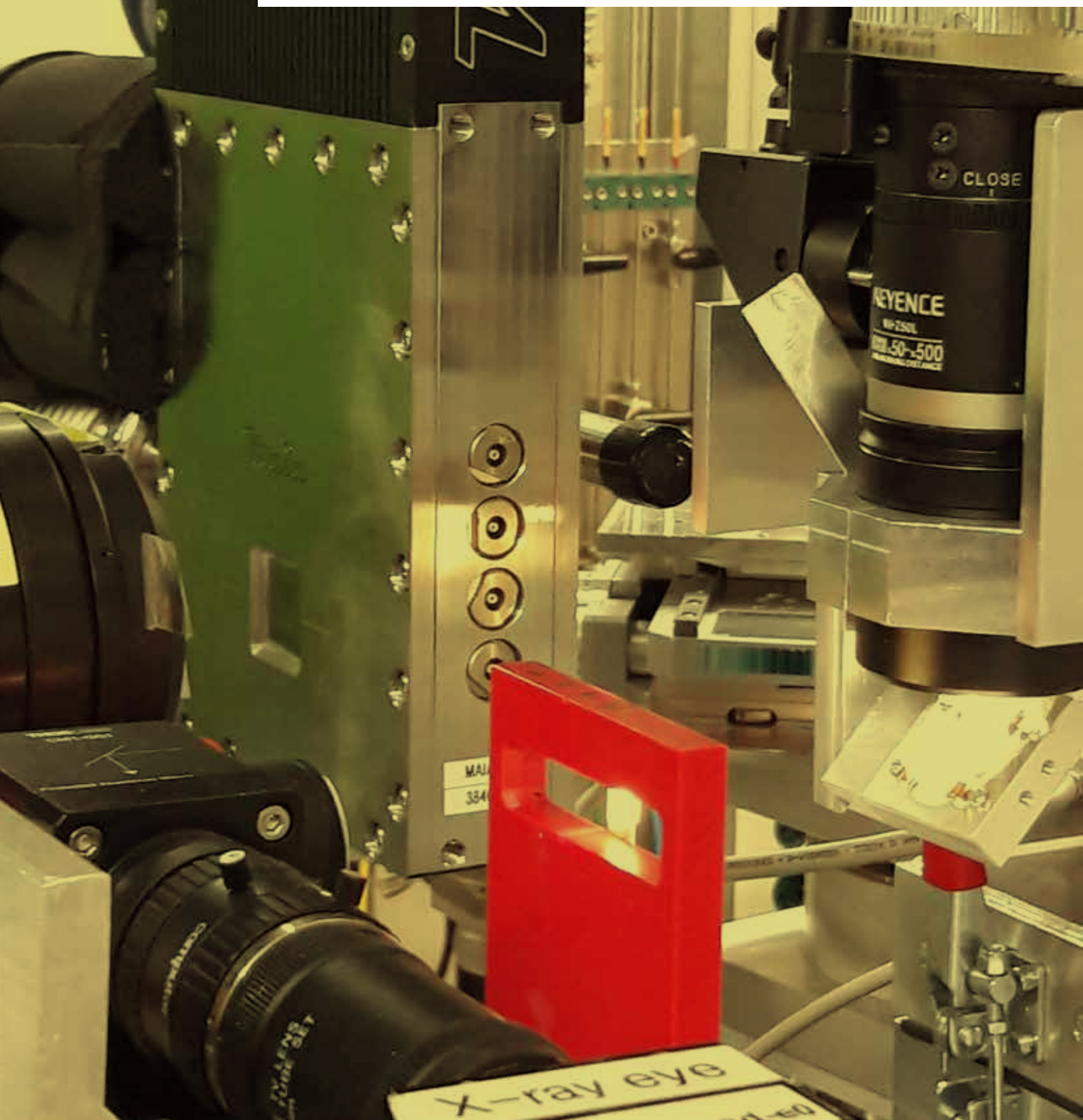
Signal d'un scintillateur LaBr3 couplé à une HPD et enregistré sur un oscilloscope. On distingue les petits signaux de quelques ns de durée, générés par la détection de γ issu de la cible irradiée. Les grands pulses de référence générés par une LED apparaissent périodiquement toutes les 10 μ s. L'instant $t=0$ correspond au tir laser^[28].

La physique nucléaire auprès des lasers de puissance peut s'opérer selon deux axes. D'une part, un plasma de type astrophysique peut être créé en laboratoire par un laser de durée d'impulsion nanoseconde et de plusieurs dizaines de Joules d'énergie, offrant alors un milieu propice aux couplages entre le noyau et son cortège. Les propriétés apparentes du noyau peuvent alors être modifiées (durées de demi-vie, écrantage de la répulsion coulombienne, etc...). Dans ce cadre une expérience préparatoire sur l'installation ELFIE a permis de quantifier le nombre d'ions avec des états de charge supérieurs à 38+, qui peut être utilisé pour mettre en évidence l'excitation du ^{201}Hg dans un plasma formé par laser. Par ailleurs une estimation des taux d'excitations de $^{84\text{m}}\text{Rb}$ qui pourraient être obtenus sur l'installation ELI-NP n'exclut pas l'observation d'un signal. Le verrou technologique des expériences de mise en évidence d'excitations nucléaires dans des plasmas demeure la détection d'observables nucléaires (spectroscopie gamma ou détection d'électrons) dans le milieu très perturbé subséquent au tir d'un laser de puissance. Nous avons accompli des progrès en réduisant le temps mort de nos détecteurs à quelques dizaines de microsecondes, mais nous devons poursuivre nos efforts pour atteindre la centaine de nanosecondes.

D'autre part, l'utilisation de lasers de puissance ultra-intenses de quelques femto secondes de durée et de quelques joules d'énergie, permet d'accélérer des particules qui pourront être utilisées pour induire des réactions nucléaires. L'intérêt des accélérateurs laser-plasma comparés aux accélérateurs conventionnels réside dans la très haute intensité pic délivrée. Cette intensité permettra de créer des noyaux à vie courte et de les plonger dans un plasma de type astrophysique et/ou de les soumettre à un autre flux intense de particules aussi accélérées par interaction laser-plasma. La mise en service des lasers de puissance à haut taux de répétition ($\sim 1\text{Hz}$) va ouvrir la voie à de véritables accélérateurs laser-plasma, quand le processus d'accélération le plus judicieux, compatible avec ces cadences de tirs sera trouvé.

- [1] T. Carreyre et al., Phys.Rev. C 62, 024311 (2000)
- [2] G. Claverie et al., Phys.Rev. C 70, 044303 (2004)
- [3] V. Malka et al., Science 298, 1298 (2002)
- [4] W-C. Barber, Annu. Rev. Nucl. Sci. 12, 1 (1962)
- [5] G. Gosselin et al., Phys. Rev. C 79, 014604 (2009)
- [6] E.V. Tkalya, Phys. Rev. C 85, 044612 (2012)
- [7] A-V. Andreev et al., J. Exp. Theor. Phys. 91, 1163 (2000)
- [8] F. Gobet et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 41, 145701 (2008)
- [9] M. Comet et al., J. Appl. Phys. 119, 013301 (2016)
- [10] X. Raymond et al., J. Appl. Phys. 122, 173302 (2017)
- [11] M. Versteegen et al., Rev. Sci. Instrum. 90, 053306 (2019)
- [12] F. Gobet et al., Appl. Phys. Lett. 116, 044102 (2020)
- [13] D. Haberberger et al., Nature Physics 8, 95 (2012)
- [14] F. Sylla et al., Phys. Rev. Lett. 110, 085001 (2013)
- [15] Chen et al., Scientific Reports 7, 20452322 (2017)
- [16] J-L. Hénarès et al., J. Phys.: Conf. Ser. 1079 012004 (2018)
- [17] J-L. Hénarès et al., Rev. Sci. Instrum. 90, 063302 (2019)
- [18] P. Puyuelo-Valdes et al., Physics of Plasmas Vol.26, Issue 12 (2019)
- [19] P. Puyuelo-Valdes et al, Proc. of SPIE 11037, 110370B-1 (2019)
- [20] T. Bonnet et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 013508 (2013)
- [21] V. Méot et al., Phys. Rev. C, 75, 064306 (2007)
- [22] M. Comet et al., Phys.Rev. C 92, 054609 (2015)
- [23] F. Gobet et al., Phys. Rev. E 98, 063202 (2018)
- [24] F. Gobet et al., Nucl. Instrum. Meth. A 653, 80 (2011)
- [25] D. Denis-Petit et al., Phys. Rev. C 96, 024604 (2017)
- [26] F. Negoita et al., Rom. Rep. Physics 68, Supplement, S37 (2016)
- [27] D-C. Carroll et al., New Journal of Physics 12, 045020 (2010)
- [28] D. Denis-Petit et al., Ch.21, Applications of Laser-Driven Particle Acceleration, Eds. Parodi, Bolton, Schreiber, CRC press, ISBN 9781498766418 (2018)
- [29] D. Khaghani et al., Scientific Reports 7, 11366 (2017)
- [30] M. Tarisien et al., Rev. Sci. Instr. 82, 023302 (2011)
- [31] F. Negoita et al., AIP Conference Proceedings 1645, 228 (2015)
- [32] M. Tarisien et al., IEEE Transact. Nucl. Science, Vol 65, issue 8, p. 2216 (2018)
- [33] V-T. Jordanov et al., Nucl. Instrum. Meth. A 345, 337 (1994)

IMAGERIE CHIMIQUE ET SPÉCIATION

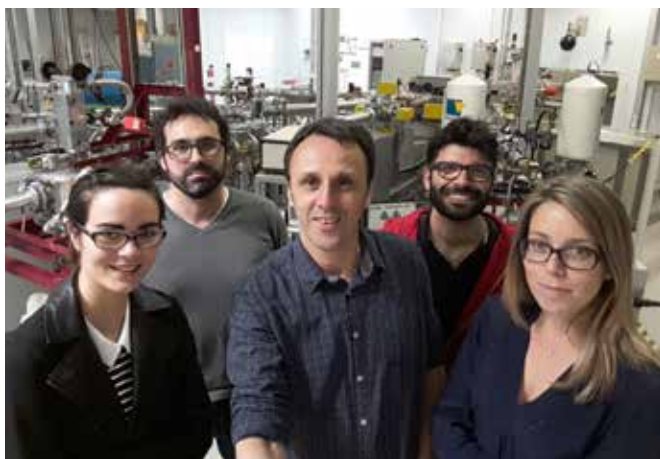


ABSTRACT

CIS (Chemical Imaging and Speciation) team develops and applies chemical imaging methods in the field of neuroscience to understand the neuro-physiological functions of metals and the neurotoxic effects of stable or radioactive inorganic contaminants. Two complementary techniques are employed: (i) Micro-ion beam chemical imaging for local quantitative analysis (PIXE, Particle Induced X-ray Emission and RBS, Rutherford Backscattering) ; (ii) Micro- and nano-synchrotron radiation probes for speciation analysis by X-ray absorption spectroscopy (XAS) and for very high spatial resolution (nano-SXRF, Synchrotron X-ray Fluorescence) imaging. Recent advances in chemical imaging methods, with gains in spatial resolution and sensitivity, offer in the field of neuroscience a very rich field of application, for the imaging and speciation of chemical elements at different scales, from synapses to subcellular compartments, up to the cellular organization of the elements in the nervous system. The results obtained reveal, for example, the interaction of iron with alpha-synuclein in dopaminergic cells, the accumulation of manganese in the Golgi apparatus, two chemical elements involved in the etiology of Parkinson's disease, or the determination of the oxidation states of these trace metals at the cellular organelle scale to better understand their toxicity mechanisms.

RÉSUMÉ

L'équipe ICS développe et applique des méthodes d'imagerie chimique dans le domaine des neurosciences pour comprendre les fonctions neurophysiologiques des métaux et les effets neurotoxiques de contaminants inorganiques stables ou radioactifs. Deux techniques complémentaires sont employées : (i) Micro-imagerie chimique par faisceau d'ions pour l'analyse quantitative locale (PIXE, Particle Induced X-ray Emission et RBS, Rutherford Backscattering) ; (ii) Micro et nano-sondes de rayonnement synchrotron pour l'analyse de spéciation par spectroscopie d'absorption des rayons X (XAS) et pour l'imagerie à très haute résolution spatiale (nano-SXRF, Synchrotron X-ray Fluorescence). Les progrès récents des méthodes d'imagerie chimique, avec des gains de résolution spatiale et de sensibilité, offrent dans le domaine des neurosciences un champ d'application très riche, pour l'imagerie et la spéciation d'éléments chimiques à différentes échelles, des synapses aux compartiments subcellulaires, jusqu'à l'organisation cellulaire des éléments chimiques dans le système nerveux. Les résultats obtenus révèlent par exemple l'interaction du fer avec l'alpha-synucléine dans les cellules dopaminergiques, l'accumulation de manganèse dans l'appareil de Golgi, deux éléments chimiques impliqués dans l'étiologie de la maladie de Parkinson ou la détermination des états d'oxydation de ces métaux traces à l'échelle des organites cellulaires pour mieux comprendre leurs mécanismes de toxicité.



PERMANENTS

Asuncion CARMONA
Richard ORTEGA
Stéphane ROUDEAU

POST-DOCTORANTS

Laura PERRIN
Francesco PORCARO

DOCTORANTS

Florelle DOMART

CHERCHEURS INVITES

Seth FRISBIE
Erin MCALLUM
Erika MITCHELL

COLLABORATIONS

Brain and Mind Centre, Sydney Medical School, The University of Sydney, Australia

The Florey Institute of Neuroscience and Mental Health, The University of Melbourne, Australia

Institute for Neuroscience, University of Texas at Austin, USA

Center for Biostructural Imaging of Neurodegeneration, University of Göttingen, Germany

Hard X-ray microprobe P06 Beamline (DESY), Hamburg, Germany

Nano-imaging beamline ID16A, ESRF (The European Synchrotron), Grenoble, France

Synchrotron SOLEIL, Gif-sur-Yvette, France

Institut Interdisciplinaire de Neurosciences (IINS), CNRS, Université de Bordeaux, France

Grenoble Institut des Neurosciences (GIN), INSERM, Université Grenoble-Alpes, France

Institut de Biosciences et Biotechnologies d'Aix-Marseille (BIAM), CEA, CNRS, Université d'Aix-Marseille, Cadarache, France

Service d'Etudes Analytiques et de Réactivité des Surfaces (SEARS), CEA, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

INTRODUCTION

L'équipe ICS s'intéresse aux effets neurobiologiques ou neurotoxiques des éléments chimiques, stables ou radioactifs, au moyen de techniques d'imagerie et de spéciation par faisceau d'ions (plateforme AIFIRA du CENBG) ou de rayonnement synchrotron (installations ESRF, SOLEIL et DESY). Ces recherches s'appuient sur des développements méthodologiques à l'interface de la chimie analytique et de la physique appliquée pour des recherches en neurosciences, voir articles de synthèse de l'équipe : ^[PERR15] ^[MENE16] ^[PORC18] ^[DAS19a]. Les principaux objectifs de l'équipe sont de comprendre les mécanismes moléculaires régissant le rôle physiologique des métaux essentiels (manganèse, fer, cuivre et zinc) dans les processus neurologiques et comment la modification des équilibres métalliques peut être impliquée dans certaines maladies neurodégénératives. Les principaux résultats obtenus sont la mise en évidence de l'interaction du zinc et du cuivre avec les protéines du cytosquelette synaptique, l'interaction du fer avec l'alpha-synucléine, une protéine impliquée dans la progression de la maladie de Parkinson, l'étude de la superoxyde dismutase une protéine à Cu,Zn dont l'agrégation serait liée à l'étiologie de la maladie de Parkinson et de la sclérose latérale amyotrophique. D'autres syndromes neurologiques peuvent être provoqués par des expositions excessives à des éléments neurotoxiques stables comme le manganèse, ou radioactifs tel que l'uranium. Les perspectives de l'équipe sont de développer une imagerie corrélative de super résolution photonique et de nano-imagerie de fluorescence X pour identifier les interactions métal-protéine à l'échelle synaptique.

IMAGERIE CORRÉLATIVE SUPER RÉOLUTION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET DES PROTÉINES SYNAPTIQUES :

- RÔLE DES MÉTAUX TRACES DANS LES FONCTIONS NEURONALES.

NEUROTOXICOLOGIE DE L'URANIUM :

- DISTRIBUTION SUBCELLULAIRE DE L'URANIUM ET INTERACTION AVEC LE MÉTABOLISME DES NEUROTRANSMETTEURS.

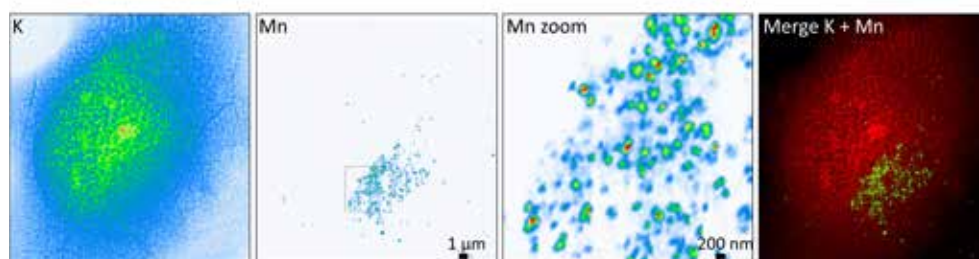
RÔLE DU FER DANS LA PROGRESSION DE LA MALADIE DE PARKINSON :

- INTERACTION DU FER AVEC L'ALPHA-SYNUCLÉINE.

NEUROTOXICOLOGIE DU MANGANÈSE :

- IDENTIFICATION DE L'APPAREIL DE GOLGI, UN ORGANITE CELLULAIRE, COMME SITE D'ACCUMULATION DU MANGANÈSE.

AGRÉGATION DE LA SUPEROXYDE DISMUTASE À CU ET ZN ET IMPLICATION DANS LES MALADIES NEURODÉGÉNÉRATIVES (PARKINSON ET SCLÉROSE LATÉRALE AMYOTROPHIQUE).



Identification de la distribution du manganèse, un élément neurotoxique, dans des vésicules de l'appareil de Golgi observé par nano-imagerie de fluorescence X [CARM19a]

1

IMAGERIE SUPER RÉOLUTION DES MÉTAUX ET PROTÉINES SYNAPTIQUES

Les éléments chimiques métalliques tels que Fe, Cu ou Zn sont présents en quantité infime dans le cerveau. Le rôle de ces métaux traces dans les fonctions neuronales, telles que la transmission synaptique et les processus de mémorisation, reste encore largement à élucider. Un modèle cellulaire avancé de neurones primaires d'hippocampe cultivés sur lit d'astrocytes et une résolution spatiale sans précédent (30 nm) disponible sur la ligne ID-16A à l'ESRF (The European Synchrotron, Grenoble) nous ont permis d'aborder un nouveau projet d'imagerie des éléments chimiques à l'échelle de la synapse. Nous avons ainsi décrit pour la première fois la distribution des métaux traces dans les épines dendritiques de neurones de l'hippocampe matures [PERR17]. Afin d'interpréter avec précision ces résultats d'imagerie, nous avons développé un protocole pour corréler l'imagerie nano-SXRF avec la microscopie super résolutive de déplétion par émission stimulée (STED) permettant ainsi

la corrélation des distributions des métaux avec celle de protéines cibles en super résolution [DOMA19]. Nous avons marqué les microtubules et l'actine-F des neurones avec des molécules fluorescentes puis imagé le cytosquelette par microscopie STED avant de déterminer par nano-SXRF les distributions des éléments P, S, Fe, Cu et Zn (figure 1). Nous avons ainsi mis en évidence la co-localisation du Zn et des microtubules au niveau dendritique, la localisation du Cu essentiellement dans le cou des épines dendritiques riches en F-actine, et une distribution du Fe sous forme de points très localisés dans les dendrites. Ces résultats ont révélé le rôle essentiel du Zn dans l'architecture du cytosquelette des dendrites de neurones d'hippocampe et la méthode d'imagerie corrélative développée ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude de la dyshoméostasie des métaux dans les maladies neurodégénératives.

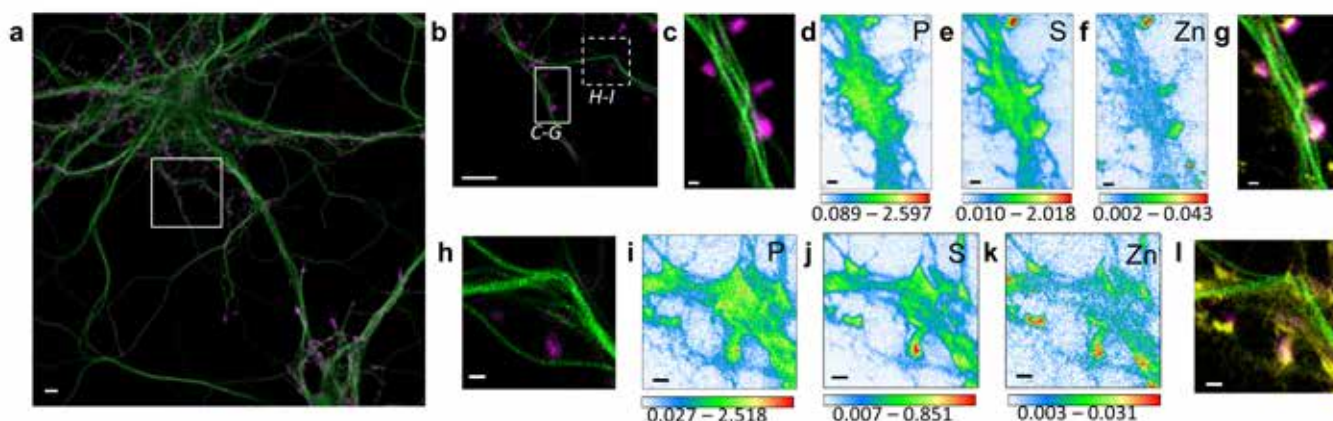


FIGURE 1

Imagerie corrélative de la tubuline (en vert) et de l'actine (en rose) (a, b, c, h) par super résolution STED, et des éléments chimiques (d, e, f, i, j, k) par rayonnement synchrotron d'un neurone de l'hippocampe, montrant la présence de zinc (en jaune) au niveau dendritique et synaptique (g, l). Barre d'échelle = 500 nm sauf pour a) 5 µm. Echelle de couleur en ng/mm² [DOMA19]

2

NEUROTOXICOLOGIE DE L'URANIUM

Dans le cadre du programme national de Toxicologie Nucléaire nous avons étudié les mécanismes de neurotoxicité de l'uranium naturel, sur des cellules humaines dopaminergiques. La viabilité cellulaire a été évaluée pour la première fois sur ce type cellulaire, montrant que la cytotoxicité de l'uranium ne se produisait qu'à des concentrations élevées (> 125 µM), loin des valeurs attendues pour l'uranium dans le sang, même après une exposition professionnelle ou accidentelle. L'imagerie micro-PIXE sur la plateforme AIFIRA du CENBG a révélé que l'uranium était localisé dans des régions périnucléaires bien définies du cytoplasme, suggérant son accumulation dans des organites (figure 2). De plus, l'expression des gènes liés à la voie dopaminergique a été quantifiée. L'expression du gène de la monoamine-oxydase B (MAO-B) est diminuée de manière statistiquement significative après exposition à l'uranium

alors que les autres gènes ne sont pas modifiés. Ce résultat original suggère que l'inhibition du catabolisme de la dopamine, mais aussi d'autres substrats de la MAO-B, pourraient constituer des effets sélectifs de neurotoxicité de l'uranium [CARM18]. Un autre volet de ce projet concernait l'analyse isotopique de l'uranium dans les cellules neuronales. En collaboration avec les équipes du CEA nous avons observé le fractionnement isotopique de l'uranium après internalisation suggérant l'existence d'une protéine de transport de haute affinité pour l'uranium [PARE16] [PARE18a] [PARE18b] [PARE19]. Dans le cadre de ce consortium nous avons aussi analysé l'urano-protéome complétant de manière exhaustive la description de l'interaction de l'uranium avec les cellules dopaminergiques [VIDA19].

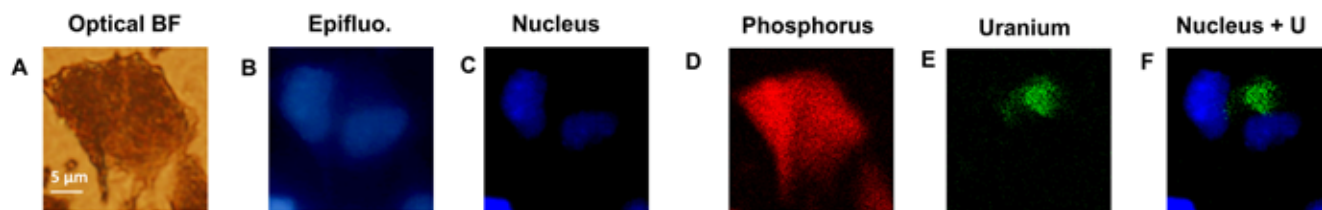


FIGURE 2

Imagerie optique et micro-PIXE de cellules dopaminergiques après exposition continue à l'uranium. (A) Microscopie optique. (B) Microscopie à épifluorescence d'un marqueur nucléaire. (C) Position du noyau dérivée de l'image d'épifluorescence. (D) Distribution du phosphore. (E) Distribution de l'uranium. (F) Superposition des images du noyau et de la distribution de l'uranium [CARM18]

3

NEUROTOXICOLOGIE DU MANGANÈSE

Le manganèse est un métal essentiel mais neurotoxique à dose élevée, il peut provoquer des symptômes proches de ceux de la maladie de Parkinson. Nous avons étudié ces mécanismes de toxicité dans le contexte d'une protéine de transport du Mn, SLC30A10, dont des mutations sont responsables de formes familiales de syndromes parkinsoniens. La forme sauvage SLC30A10 assure l'efflux de Mn vers le milieu extracellulaire, protégeant ainsi la cellule de la toxicité de ce métal. En combinant la microscopie de fluorescence X induite par rayonnement synchrotron (nano-SXRF), nous avons montré une accumulation de Mn dans l'appareil de Golgi des cellules qui expriment la mutation SLC30A10-Δ105-107 [CARM19a]. Les premiers résultats de la distribution du Mn dans les cellules affectées ont été obtenus au synchrotron DESY (Hambourg, Allemagne). Les cartographies ont été complétées par de nouvelles images réalisées à l'ESRF (The European Synchrotron, Grenoble), ce qui a permis d'affiner la localisation du Mn et d'établir qu'il est piégé dans des nano-vésicules de 50 nm environ liées à l'appareil de Golgi (figure 3). La maladie serait donc causée par une accumulation de Mn dans l'appareil de Golgi qui perturberait le transport vésiculaire. Ces travaux ont été complétés par la validation par nano-SXRF de la localisation du Mn dans l'appareil de Golgi également observée avec des fluorophores spécifiques du Mn [DAS19b].

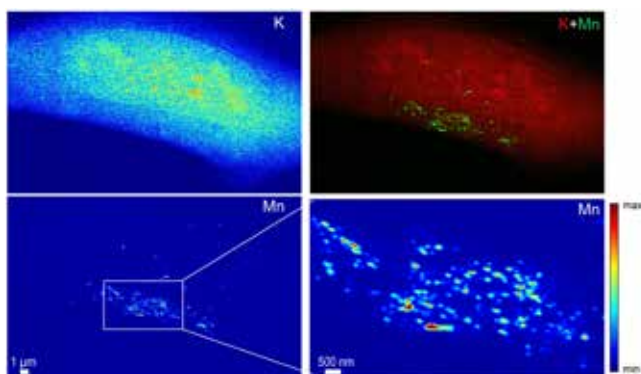


FIGURE 3

Distributions du potassium (K) et de manganèse (Mn) obtenues à haute résolution spatiale dans une cellule exprimant la protéine mutante SLC30A10-Δ105-107 et exposée au Mn. Un zoom dans la zone riche en Mn révèle la distribution ponctuelle de cet élément dans des structures de 50 nm, identifiées comme étant des vésicules de l'appareil de Golgi [CARM19a]

4

HOMÉOSTASIE DU FER ET MALADIE DE PARKINSON

La perturbation de l'homéostasie du fer pourrait jouer un rôle important dans la pathogenèse de la maladie de Parkinson par induction de stress oxydant et/ou promotion de l'agrégation de l'alpha-synucléine. Ainsi, la maladie de Parkinson se caractérise par des agrégats d'alpha-synucléine et des niveaux élevés de fer dans la substantia nigra (SN) des patients, mais l'interconnexion potentielle entre ces deux changements moléculaires est encore mal comprise. Comme l'alpha-synucléine peut fixer le fer *in vitro* nous avons testé l'hypothèse que la teneur en fer et sa distribution pourraient être modifiées dans les cellules sur-exprimant l'alpha-synucléine [ORTE16] (figure 4). Grâce aux méthodes d'imagerie chimique nano-SXRF et micro-PIXE, nous avons quantifié et décrit la distribution du fer au niveau subcellulaire. Nous montrons que, dans les neurones exposés à un excès de fer, la surexpression de l'alpha-synucléine humaine conduit à l'augmentation du niveau de fer intracellulaire et à sa redistribution dans le cytoplasme, vers les inclusions d'alpha-synucléine. Nos résultats relient deux caractéristiques moléculaires spécifiques de la maladie de Parkinson, l'accumulation de l'alpha-synucléine et l'augmentation des niveaux de fer dans la substantia nigra [ORTE16]. Nous avons aussi développé une approche expérimentale pour cartographier les éléments chimiques sur des régions de cerveau bien identifiées en utilisant une imagerie corrélative immunohisto-chimique et élémentaire. Nous avons appliqué cette méthodologie à l'étude d'un modèle animal de la maladie de Parkinson, le rat lésé avec la 6-hydroxydopamine (6-OHDA). Le marquage immunohisto-chimique par la tyrosine hydroxylase a permis d'identifier la SN pars compacta (SNpc) et pars reticulata (SNpr) ainsi que l'aire ventrale tegmentale (VTA). En utilisant la technique PIXE, nous avons constaté que la teneur en fer était respectivement plus élevée dans SNpr > SNpc > VTA, mais qu'elle n'était pas modifiée par le traitement avec la 6-OHDA. En outre, le micro-SXRF a révélé une teneur plus élevée en manganèse dans la SNpc par rapport à la SNpr. À l'aide de micro-XANES, nous avons identifié les états d'oxydation du Fe dans le SNpr et le SNpc, présentant une similarité spectrale comparable à celle de la ferritine pour toutes les régions du cerveau et les conditions d'exposition. Cette étude illustre la capacité de corréler l'immunohisto-chimie et l'imagerie des éléments chimiques au niveau des régions du cerveau et ce protocole peut maintenant être largement appliqué à d'autres études sur la dyshoméostasie des métaux en neurologie [CARM19b].

L'objet de l'étude en cours est la détermination du rapport Cu/Zn de la superoxyde dismutase à Cu/Zn (SOD1) impliquée dans la sclérose latérale amyotrophique (SLA) et la maladie de Parkinson. L'approche mise en œuvre implique le couplage de méthodes de séparation des protéines telle que l'électrophorèse non dénaturante sur gel de polyacrylamide avec l'analyse par faisceau d'ions PIXE [ROUD15]. Nous avons participé à la mise en évidence d'agrégats de SOD1 dans le cerveau de patients parkinsoniens [TRIS16a] [TRIS16b] [TRIS17] en collaboration avec les équipes de Kay Double (Université de Sydney) et Dominic Hare (Université de Melbourne). Ces agrégats sont associés à la mort des neurones mais ils sont

différents des agrégats typiques d'alpha-synucléine bien connus dans la maladie de Parkinson. Résultat inattendu, ils sont similaires aux inclusions de SOD1 retrouvées dans les motoneurons de cas familiaux de SLA. Dans le cas de la maladie de Parkinson, les analyses de la SOD1 ont montré une augmentation du point isoélectrique de l'enzyme (équivalent à une diminution de la charge nette), une conformation anormale et un déficit partiel de Cu dans les dépôts SOD1. Ces données suggèrent donc l'existence d'un mécanisme toxique commun aux deux pathologies, SLA et Parkinson, via la formation d'agrégats toxiques de SOD1.

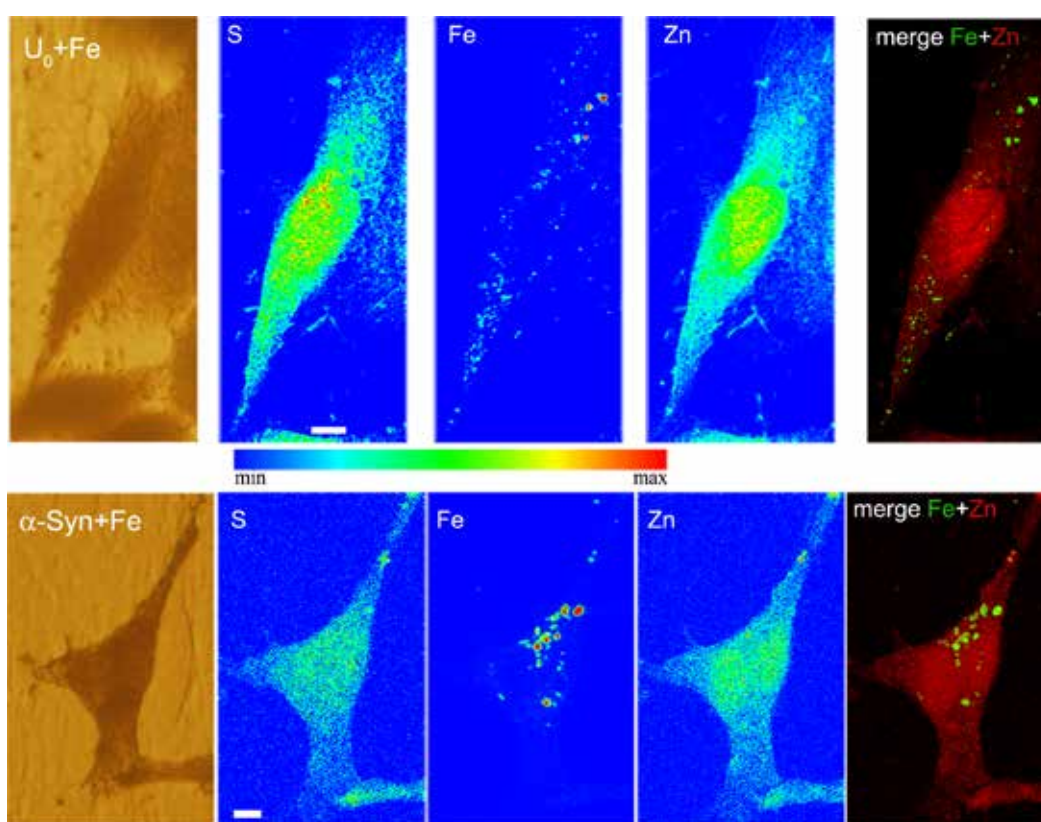


FIGURE 4

Imagerie nano-SXRF de neurones dopaminergiques exposés in vitro à un excès de fer sans (haut) ou avec (bas) surexpression de l'alpha-synucléine. Dans les neurones sur-exprimant l'alpha-synucléine le fer s'accumule dans des inclusions périnucléaires [ORTE16]

[CARM18] A. Carmona et al., *NeuroToxicology*, 68, 177-188 (2018)
 [CARM19a] A. Carmona et al., *ACS Chemical Neuroscience*, 10, 599-609 (2019)
 [CARM19b] A. Carmona et al., *Frontiers in Neuroscience*, 13, 1014 (2019)
 [DAS19a] S. Das et al., *Dalton Transactions*, 48, 7047-7061 (2019)
 [DAS19b] S. Das et al., *Inorganic Chemistry*, 58, 13724-13732 (2019)
 [DOMA19] F. Domart et al., *BioRxiv*, 810754 (2019)
 [MENE16] M. Menezes Lyra da Cunha et al., *Micron*, 84, 23-36 (2016)
 [ORTE16] R. Ortega et al., *Molecular Neurobiology*, 53, 1925-1934 (2016)
 [PARE16] E. Paredes et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 113, 14007-14012 (2016)
 [PARE18a] E. Paredes et al., *Scientific Reports*, 8, 17163 (2018)

[PARE18b] E. Paredes et al., *Talanta*, 178, 894-904 (2018)
 [PARE19] E. Paredes et al., *Analyst*, 144(20), 5928-5933 (2019)
 [PERR15] L. Perrin et al., *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 30, 2525-2532 (2015)
 [PERR17] L. Perrin et al., *ACS Chemical Neuroscience*, 8, 1490-1499 (2017)
 [PORC18] F. Porcaro et al., *Trends in Analytical Chemistry*, 104, 22-41 (2018)
 [ROUD15] S. Roudeau et al., *Electrophoresis*, 36, 2482-2488 (2015)
 [TRIS17a] B. G. Trist et al., *Acta Neuropathologica*, 134, 113-127 (2017)
 [TRIS16a] B. G. Trist et al., *Movement Disorders*, 31, S241-S242 (2016)
 [TRIS17b] B. G. Trist et al., *Journal of Neurochemistry*, 134, S1, 135 (2017)
 [VIDA19] C. Vidaud et al., *Archives of Toxicology*, 93, 2141-2154 (2019)

INTERACTIONS RAYONNEMENTS IONISANTS ET BIOLOGIE



ABSTRACT

The research activities of the iRiBio team (Ionizing Radiation Interactions and Biology) are based on the development of multimodal analysis techniques, imaging and irradiation using focused ion beam in order to address basic fundamental mechanisms at the interface between physics, biology, biochemistry or health. Our transdisciplinary research themes have in common to use the ionizing radiation interactions with the living matter to (i) study the radiation-induced effects in biological specimens at low dose (ii) to probe the cellular metabolism in response to normal or stress conditions as for example metal oxide nanoparticles.

RÉSUMÉ

Les activités de l'équipe iRiBio (Interactions Rayonnements Ionisants et Biologie) s'appuient sur le développement de techniques innovantes d'analyse, d'imagerie et d'irradiation par faisceaux d'ions focalisés afin de répondre à des applications fondamentales à l'interface avec la physique, la biologie, la chimie du vivant et de la santé. Les thèmes de recherche interdisciplinaire abordés par le groupe ont en commun de se baser sur les interactions rayonnements ionisants et le vivant, soit en les utilisant pour comprendre les mécanismes de régulation de l'homéostasie du vivant, soit en tant que telles en étudiant les réponses biologiques radio-induites en conditions d'expositions contrôlées en termes de dose et de cible biologique.

PERMANENTS

Philippe BARBERET
Guillaume DEVÈS
Franck GOBET
Sébastien INCERTI
Claire MICHELET
Philippe MORETTO
Laurent PLAWINSKI
Hervé SEZNEC

POST-DOCTORANTS

Dosatsu SAKATA
Marina SIMON

DOCTORANTS

Zhuxin LI
Wook-Geun SHIN
Eva TORFEH
Nicolas TANG
Nathanael LAMPE
Julien BORDES
Giovanna MUGGIOLU
Sylvain MEYLAN
Florent VILOTTE

COLLABORATIONS

B. Audoin – Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux, UMR5295 CNRS, Université de Bordeaux

É. Chevet – Laboratoire Chimie, Oncogénèse, Stress et Signalisation – UMR 1242 Inserm, Université de Rennes 1

G. Coussot – Institut des Biomolécules Max Mousseron, UMR 5247, CNRS, Universités de Montpellier 1 et 2

M-H. Delville – Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux, UMR 5026 CNRS, Université de Bordeaux, France

P. Desbarats – Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique, UMR 5800 CNRS, Université de Bordeaux

D. Dupuy – Institut Européen de Chimie et Biologie, UMR5320 et U1212 CNRS/INSERM, Université de Bordeaux, France

G. Dollinger - Institut für Angewandte Physik und Messtechnik, Universität der Bundeswehr München

Collaborations Geant4 (<http://geant4.org>) et **Geant4-DNA** (<http://geant4-dna.org>)

J-F Giovannelli – Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système, UMR5218 CNRS, Université de Bordeaux

T. Guérin, T. Salez – Laboratoire Ondes et Matières d'Aquitaine, UMR 5798 CNRS, Université de Bordeaux

G. Kantor – Service de Radiothérapie - Oncologie du Centre anti-cancer de l'Institut Bergonié, Université de Bordeaux, France

S. Lacombe – Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO), Université Paris-Sud 11, Orsay, France

C. Lecomte-Pradines – Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN), Laboratoire Ecotoxicologie des Radionucléides (LECO), Saint-Paul-Lez-Durance

A. Le Postollec, M. Dobrijévic – Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux, UMR 5804 CNRS, Université de Bordeaux

M. Pomorski, Laboratoire Capteurs Diamant, CEA-LIST, Saclay

S. Smolikove "DNA damage repair and chromosome synapsis in meiosis", The University of Iowa

VINCO U1218, INSERM Centre anti-cancer de l'Institut Bergonié, Université de Bordeaux, France

M-C. Vozenin, Laboratoire de recherche en radio-oncologie – CHU Lausanne, Suisse

Plateforme Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine (AIFIRA) Plateforme d'imagerie de Bordeaux

INTRODUCTION

L'équipe **"Interactions Rayonnements Ionisants et Biologie" (iRiBio)** est une équipe de recherche transdisciplinaire constituée de 8 membres permanents (physiciens, chimistes et biologistes). Sur la période 2015-2019, l'équipe a accueilli 2 chercheurs post-doctorants (physicien, biologiste) et 5 doctorants (physiciens, biologiste, médecin).

Comme son nom l'indique, l'équipe iRiBio développe des programmes de recherches basés sur les interactions des rayonnements ionisants avec la matière vivante. Nos activités peuvent se décliner selon deux principes : (i) exploiter ces interactions pour comprendre l'organisation et les grandes fonctions physiologiques qui régissent les êtres vivants, (ii) modéliser/étudier ces interactions et les réponses biologiques radio-induites au sein d'organismes vivants en conditions *in vitro* et *in vivo*.

Nos approches se veulent multi-échelles car elles se déclinent à l'échelle de la molécule (ADN génomique), de la cellule (saines *versus* cancéreuses), de l'organisme aux populations (avec l'utilisation du nématode *Caenorhabditis elegans*) et multi-dimensions (imagerie tridimensionnelle, analyse *in cellulo* dynamique et cinétique en temps réel).

Dans ce sens, le groupe iRiBio s'appuie sur le développement de techniques d'analyse chimique, d'imagerie et d'irradiation par faisceaux d'ions focalisés à l'échelle sub-micrométrique afin de répondre à des questions fondamentales à l'interface avec la biologie, la physique des rayonnements ionisants et la chimie du vivant. Dans le cadre de ces développements expérimentaux, l'équipe iRiBio s'appuie et interagit au quotidien avec l'ensemble des services techniques du CENBG (service instrumentation, bureau d'études et service mécanique, service informatique, administration, communication). Notre équipe est également étroitement associée aux activités techniques et scientifiques de la plateforme AIFIRA (Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine) en tant que développeurs, utilisateurs et en tant que membre des comités d'expertises.

En matière d'enseignement, l'équipe iRiBio est associée à l'école doctorale Sciences de la Vie et de la Santé et l'école doctorale Sciences Physiques et de l'Ingénieur de l'Université de Bordeaux.

Les enseignants-chercheurs de l'équipe sont également fortement impliqués dans les formations universitaires avec leur participation à la création et aux responsabilités de formations en ingénierie de la physique des rayonnements ionisants ^{(1),(2)}.

Les thèmes de recherche, singulièrement transdisciplinaires, abordés par l'équipe iRiBio peuvent se décliner selon 2 principes : **(i) utiliser les interactions des rayonnements ionisants avec la matière pour étudier et comprendre les mécanismes de régulation de l'homéostasie chez les êtres vivants ; (ii) utiliser les interactions des rayonnements ionisants avec le Vivant afin de prédire, quantifier et analyser les conséquences biologiques radio-induites.**

L'ÉQUIPE IRIBIO RASSEMBLE L'ENSEMBLE DES COMPÉTENCES TECHNIQUES, SCIENTIFIQUES ET HUMAINES NÉCESSAIRES À LA RÉALISATION DE PROGRAMMES DE RECHERCHE TRANSDISCIPLINAIRES.

ÉQUIPE DE RÉFÉRENCE DANS LES DOMAINES DE LA MODÉLISATION (GEANT4-DNA), DE LA MICRO-IRRADIATION ET DE LA MICRO-ANALYSE CHIMIQUE AU TRAVERS DU DÉVELOPPEMENT ET DE L'OPTIMISATION DES MICROSONDES NUCLÉAIRES INSTALLÉES SUR LA PLATEFORME AIFIRA DU CENBG.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE REPOSANT SUR UN SOCLE DE COLLABORATIONS DANS LES DOMAINES DE LA PHYSIQUE INSTRUMENTALE, DE LA MODÉLISATION ET DE LA RECONSTRUCTION NUMÉRIQUES, DE LA CHIMIE DES NANOPARTICULES, DE LA RADIOBIOLOGIE/RADIOTHÉRAPIE ET DU CANCER...

1

L'UTILISATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS POUR COMPRENDRE L'ORGANISATION ET LES FONCTIONS PHYSIOLOGIQUES QUI RÉGISSENT L'HOMÉOSTASIE CHEZ LES ÊTRES VIVANTS

1 Vers la définition des mécanismes d'interactions entre nanoparticules d'oxydes métalliques et l'évaluation de perspectives thérapeutiques anticancéreuses

Dans le domaine des nanosciences, et de la nanomédecine en particulier, se pose la question de la détection, de la quantification et du devenir des nanoparticules au sein des organismes biologiques. Il est donc essentiel de préciser les mécanismes impliqués dans ces processus de toxicité et de les caractériser au sein de modèles biologiques *in vitro* et *in vivo*. Ces données sont essentielles dans la perspective de développements de nouvelles approches thérapeutiques combinant rayonnements ionisants et nanoparticules d'oxydes métalliques.

Dans un premier temps, nous avons validé une méthode de micro-analyse quantitative et d'imagerie corrélative multimodale qui se résume à analyser les mêmes échantillons cellulaires en microscopie de fluorescence, microscopie électronique et par micro-analyse chimique afin de définir précisément (i) l'accumulation et la distribution intracellulaire de nanoparticules d'oxydes de métalliques ; (ii) les mécanismes de toxicité de ces nanoparticules ; (iii) leur devenir au sein de modèles biologiques d'intérêt ^{[MUGGI 18] [LETR 15]}.

Dans un second temps, nos différentes expertises dans les domaines : (i) de la microdosimétrie (simulation & modélisation Monte Carlo), (ii) de la radiobiologie expérimentale (irradiation cellulaire), (iii) de la toxicologie et micro-analyse chimique multi-élémentaire ont été combinées afin d'évaluer la radiosensibilité de lignées cancéreuses issues de patients dont les corrélations génotypes/phénotypes ont été établies, et d'évaluer le potentiel radio-potentialisant ou radio-sensibilisant de nanoparticules d'oxydes métalliques d'intérêt (dioxyde de titane, oxyde d'hafnium).

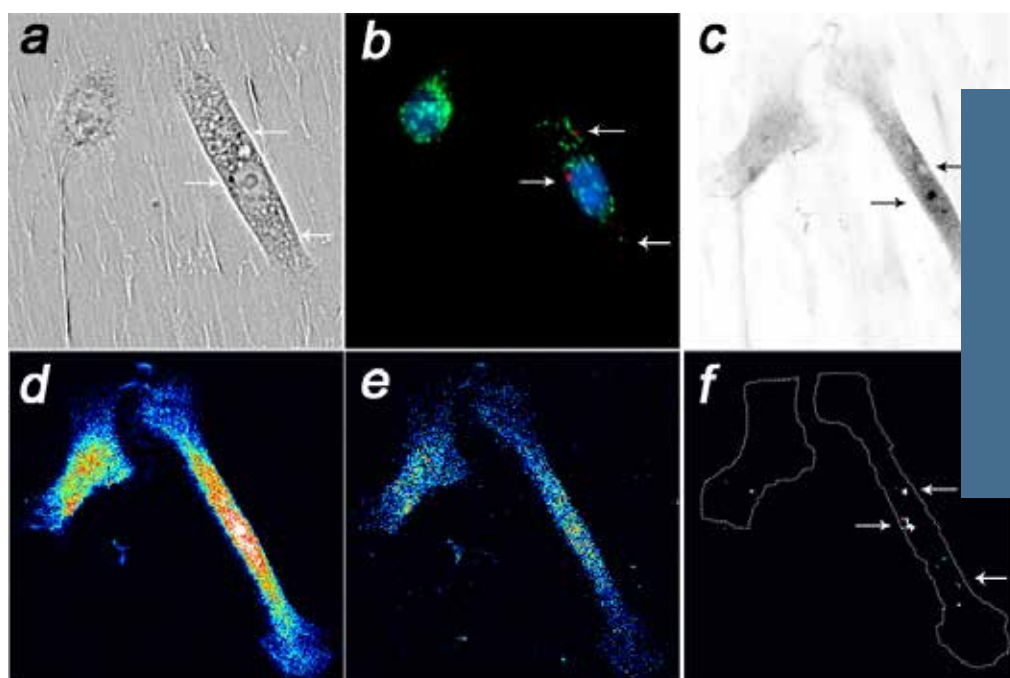
Pour exemple, des outils de simulation adaptés ont été développés afin de modéliser de manière réaliste les dépôts d'énergie et de

dose à l'échelle cellulaire lors d'irradiations. La mise au point de fantômes cellulaires (nommés ainsi par analogie avec les fantômes utilisés en radiothérapie) par imagerie confocale et la modélisation détaillée de nos dispositifs d'irradiation à l'aide de Geant4 nous a permis de caractériser au mieux les processus physiques mis en jeu à l'échelle submicronique. De plus, l'intégration de la composition chimique et notamment de la distribution et quantification à l'échelle cellulaire de composés exogènes tels que des nanoparticules d'oxydes métalliques nous a permis d'affiner les processus d'interactions physico-chimiques dans le cadre de l'évaluation de ces protocoles émergents de radiothérapie associant rayonnements ionisants et nanoparticules d'oxydes métalliques.

Enfin, nos travaux ont permis d'identifier une relation entre le niveau d'internalisation des nanoparticules et l'augmentation de la concentration intracellulaire de calcium. Cette altération de l'homéostasie calcique est étroitement associée au niveau de toxicité de la nanoparticule dépendant de sa forme et de sa réactivité de surface ainsi que de la quantité internalisée ^[SIMO 17].

Ces travaux ont été financés dans les cadres du programme européen SPRITE (Initial Training Network Marie Curie), des programmes régionaux POPRA et POPRA 2 financés par le Conseil Régional d'Aquitaine, du programme du "Défi Nano" de la MITI du CNRS et ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration avec le Centre Régional de lutte contre le Cancer de Bordeaux (PR G. Kantor, Institut Bergonié), d'une unité de recherche INSERM (Vinc/INSERM) et de l'équipe de M-H. Delville (chimiste, INC/CNRS). L'ensemble des protocoles sont également mis à la disposition de la communauté AIFIRA ^[DEVE 15].

Pendant cette période, 4 articles dans des journaux à comité de lecture ont été publiés et 2 thèses de Sciences (Biologie, Physique) et une thèse de médecine ont été dédiées à ce sujet.



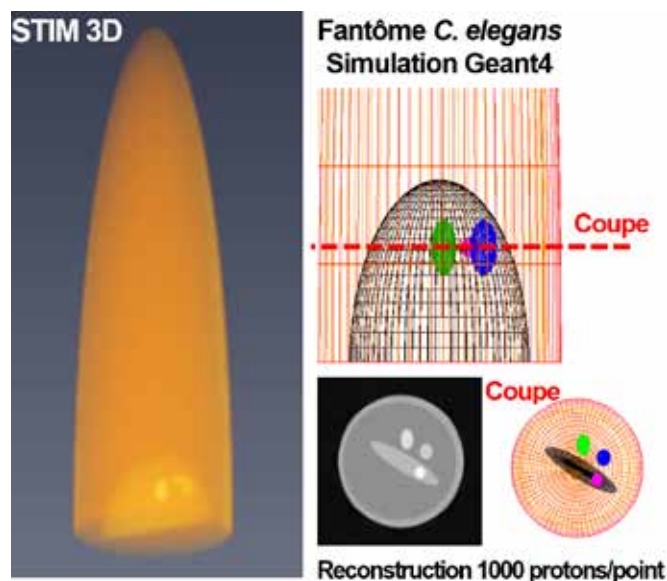
2 Tomographie par faisceau d'ions : de la cellule unique à l'organisme multicellulaire

L'équipe iRiBio explore continuellement de nouvelles approches d'imagerie protonique pour le vivant (cellules en culture, microorganismes). Le développement des techniques d'imagerie protonique 3D par tomographie donne accès à une information quantitative : d'une part elle révèle la structure des échantillons, par mesure de la masse (densitométrie), information provenant de l'analyse du spectre en énergie obtenu en transmission (STIM: Scanning Transmission Ion Microscopy). D'autre part, la composition chimique élémentaire de la région sous faisceau est obtenue grâce à l'analyse du spectre d'émission X induit (PIXE: Particle Induced X-ray Emission) [MICH 15].

Deux domaines de recherche sont explorés : (i) la nanotoxicologie ; (ii) l'optimisation d'approches thérapeutiques anticancéreuses associant irradiation proton (protonthérapie) et nanoparticules métalliques (approche théranostique). D'un point de vue méthodologique, il s'agit d'une part de détecter et de localiser les nanoparticules à l'échelle cellulaire par leur signature chimique, et d'autre part de les quantifier *in situ*. Les méthodes d'imagerie protonique 3D par tomographie sont indispensables pour compléter l'approche "classique" en imagerie 2D car elles donnent accès à une localisation à l'intérieur des structures sondées.

Une modélisation sous Geant4 du dispositif expérimental a été développée [MICH 19]. Des fantômes de référence, dont un modèle de *Caenorhabditis elegans*, ont été définis pour évaluer l'effet des méthodes de reconstruction utilisées. Le but est d'évaluer la précision de la reconstruction, en particulier de tester l'efficacité des méthodes de correction d'atténuation du signal employées [MICH 17].

Ces travaux ont été menés en collaboration avec l'équipe "Image et Son" du LaBRI (P. Desbarats) et le groupe "Signal-Image" de l'IMS (J.-F. Giovannelli) et ont été financés par les programmes "Défi Imag'In" de la MITI du CNRS (projets NUMÉTRIX en 2018 et PROTON3D en 2016).



Vue
schématique
du fantôme
de *C. elegans*

2

L'UTILISATION DES INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LE VIVANT AFIN DE PRÉDIRE, QUANTIFIER ET ANALYSER LES CONSÉQUENCES BIOLOGIQUES RADIO-INDUITES

1 Simulations Monte Carlo Geant 4 à l'interface Physique-Médecine-Biologie

Le groupe iRiBio coordonne depuis 2008 le développement de la physique électromagnétique de basse énergie de l'outil Monte Carlo généraliste "Geant4" (<http://geant4.org>) [ALL 16], ainsi que son extension "Geant4-DNA" vers la radiobiologie (<http://geant4-dna.org>) [INCE 18]. Ces deux outils, totalement ouverts et accessibles à tous, sont développés par deux collaborations internationales. Au cours des cinq dernières années et au sein de ces deux collaborations, nos efforts se sont principalement concentrés sur l'amélioration des modèles décrivant les interactions élastiques et inélastiques des électrons dans l'eau liquide et dans l'or afin de simuler les structures de traces dans ces deux milieux. La possibilité de simuler les interactions élémentaires des électrons dans l'or est une fonctionnalité qui revêt tout son intérêt pour les études de radio-sensibilisation induite par nanoparticules d'or.

Nous avons également implémenté la simulation des cascades de désexcitation atomiques (émission Auger et fluorescence) et avons amélioré la simulation (approche pas-à-pas) de la radiolyse de l'eau. En outre, des géométries de cibles biologiques simplifiées (bactérie *E. coli*, noyaux cellulaires) ont été développées afin de construire deux chaînes de simulation complètes (combinant physique, radiolyse, géométries) permettant de prédire l'induction de dommages biologiques directs et indirects précoces à l'échelle de l'ADN. Le développement de ces deux chaînes représente l'aboutissement de dix ans de travail au sein de la collaboration Geant4-DNA. D'autres plateformes utilisateurs, comme GATE ou TOPAS/TOPAS-nBio utilisent désormais certains de ces développements. En parallèle, en collaboration avec le Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, l'Institut des biomolécules Max Mousseron et leurs collègues, nous nous sommes aussi impliqués dans l'étude (simulations, expériences) de la résistance aux radiations d'échantillons de biopuces (aptamères, anticorps) pour l'exobiologie, avec notamment l'envoi d'échantillons à bord de la

Station spatiale Internationale (mission EXPOSE-R2) ^[COUS 19]. Enfin, le groupe a organisé l'édition 2018 de la série de conférences internationales "Geant4 at the Physics-Medicine-Biology Frontier" qu'il a initiée en 2005.

Depuis 2015, 78 articles publiés dans des journaux à comité de lecture et 5 thèses ont été dédiés à ces sujets. Nous avons bénéficié de plusieurs soutiens budgétaires notamment du CNRS, de l'université de Bordeaux, de l'agence spatiale européenne (ESA) et de l'Australian Research Council.

2 Étude in situ et en temps réel de la fragmentation radio-induite de l'ADN (INSIDE)

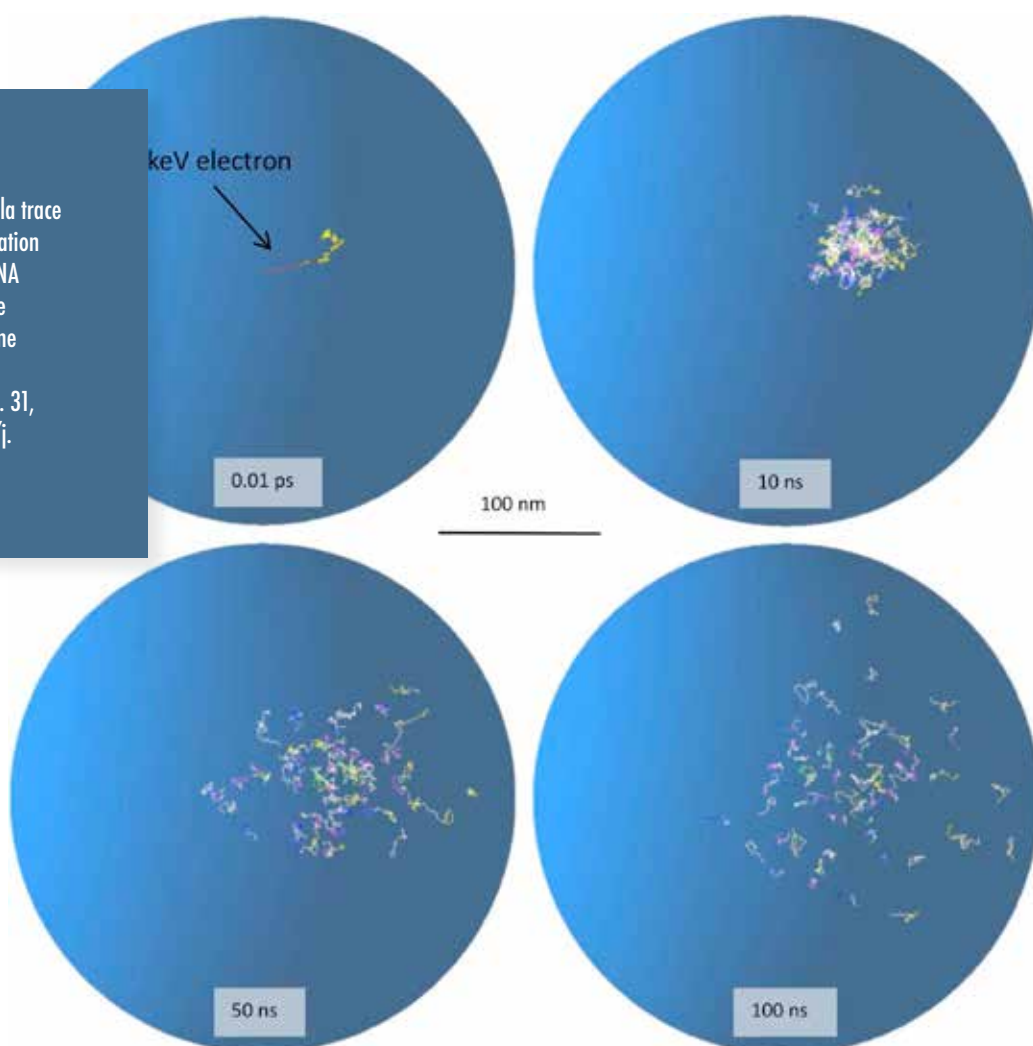
Le projet INSIDE ("In Situ Detection of DNA-fragmentation induced by proton collision"), initié en 2019, vise à mesurer des probabilités de fragmentation simple et double brins d'ADN en solution dans une couche d'eau d'épaisseur micrométrique pour des dépôts d'énergie contrôlés en dose, dans le temps et dans l'espace. Ces mesures sur des modèles physiques simples seront à terme comparées avec des calculs Geant4-DNA afin de répondre à plusieurs questions : (i) quelle fluence minimale de protons génère des brisures doubles brins pour un paramètre d'impact donné ? (ii) à quelle distance de l'ADN des effets indirects continuent-ils de jouer un rôle dans la fragmentation de la macromolécule en solution aqueuse ? (iii) la fragmentation d'ADN est-elle induite par un effet cumulatif de dépôt d'énergie ou est-ce un processus stochastique ne faisant intervenir qu'une ou quelques particules incidentes ? Ce programme de recherche s'articule autour de deux types

de mesures dites "offline" et "online". Dans le cadre de mesures "offline", nous souhaitons déterminer des taux de fragmentation par des techniques d'électrophorèse ou de séquençage d'ADN, après un dépôt de dose donné dans la solution d'ADN. Dans ces conditions, des études systématiques sont réalisées en faisant varier les concentrations d'ADN dans la solution et ce, en présence ou non d'antioxydant afin de différencier les processus de fragmentation "directs" et "indirects" intervenant dans les mécanismes d'interactions particule/matière d'intérêt biologique.

Dans le cadre de mesures "online" l'enjeu est, à ce jour, de mettre en place l'ensemble des outils/méthodes nécessaires à l'observation *in situ* de la dynamique de fragmentation simple et double brin d'une molécule d'ADN en solution après un dépôt d'énergie contrôlé dans le temps et dans l'espace. Par des techniques de fluorescence optique, nous proposons notamment d'étudier l'évolution du mouvement brownien des brins d'ADN irradiés à travers la mesure de leur constante de diffusion et de leur rayon de giration. Une observation expérimentale des phénomènes de ségrégation résultant de la fragmentation double brins de l'ADN serait une première à notre connaissance et pourrait conduire dans une seconde phase du projet à des résultats de tout premier ordre sur les mécanismes de fragmentation de l'ADN et leurs dépendances avec le paramètre d'impact, l'énergie déposée ou encore la présence de nanoparticules dans la solution.

Ce projet bénéficie d'un financement 2019 dans le cadre de l'appel à projet MITI du CNRS : "Modélisation du vivant" et fait l'objet d'une collaboration avec des physiciens théoriciens de la matière molle au LOMA (université de Bordeaux).

Simulation de l'évolution des produits de la radiolyse dans la trace d'un électron de 1 keV. Simulation réalisée à l'aide de Geant4-DNA dans une sphère d'eau liquide de 150 nm de diamètre sur une période de 100 nsec(3).
Bernal M. A. et al., Phys. Med. 31, 2015, 861-874 doi : 10.1016/j.ejmp.2015.10.087



3 Micro-irradiation en dose contrôlée et analyse dynamique, quantitative et en temps réel : de la cellule à l'organisme

L'objectif de cet axe de recherche est de définir l'impact des expositions à des doses contrôlées de rayonnement ionisant sur les organismes vivants. À ce jour, la compréhension des mécanismes moléculaires et cellulaires impliqués dans les réponses radio-induites, notamment dans le cadre d'expositions à faible dose, reste encore limitée.

L'expertise transdisciplinaire du groupe iRiBio offre l'opportunité : (i) de mettre en œuvre des modèles biologiques cellulaires et multicellulaires originaux (cellules cancéreuses humaines et organisme multicellulaire de référence : *Caenorhabditis elegans*) dans des conditions expérimentales contrôlées (microsonde nucléaire), (ii) d'étudier en temps réel les conséquences biologiques radio-induites (vidéo-microscopie) et de réaliser l'analyse quantitative de cinétique moléculaire de ces réponses en fonction de la dose, (iii) de définir l'impact de ces expositions sur l'intégrité/stabilité du génome, sur le développement d'un organisme *in vivo* [BARB 15]. L'intégration dynamique et cinétique de l'ensemble des variables telles que la nature des dommages, leur détection, leur réparation et les conséquences moléculaires et cellulaires lors des phases précoces de la réponse radio-induite (dommages ADN) sont réalisées en fonction du type de particules (particules alpha versus proton) ou de la dose d'un point de vue qualitatif et quantitatif.

Au cours de cette période, l'équipe s'est investie dans l'intégration sur la microsonde d'un détecteur mince en transmission. Ce détecteur permet de suivre l'intensité du faisceau avec une grande précision et ainsi d'atteindre le cas extrême d'une particule par cellule, tout en préservant une précision de tir de l'ordre du micromètre. Le détecteur développé a été réalisé en amincissant un diamant monocristallin à 2 μm d'épaisseur. Celui-ci, recouvert d'électrodes transparentes, génère une impulsion électrique pour chaque proton le traversant tout en permettant l'observation des échantillons biologiques par microscopie optique. Il s'agit du premier détecteur mince en transmission permettant le comptage

de protons de quelques MeV avec une efficacité supérieure à 98%. Celui-ci est maintenant utilisé en routine sur la plateforme AIFIRA. Ce travail a été publié dans la revue *Applied Physics Letters* en 2017 [BARB 17], a été retenu pour la page de couverture du journal et également fait l'objet de communiqués de presse (American Institute of Physics, IN2P3).

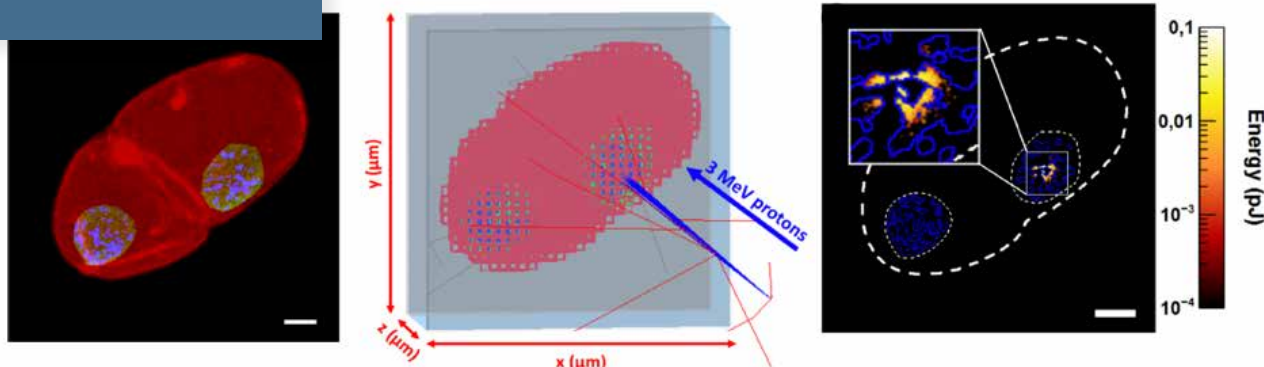
Cette évolution technique majeure nous a également permis d'optimiser nos expériences d'irradiation réalisée à l'échelle de la cellule (approche *in vitro*) et de réaliser notamment la détection et le suivi en temps réel de protéines de réparation (Protéines GFP-XRCC1 et RNF8-GFP) en réponse à des irradiations à la dose ultime d'une particule alpha par cellule. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans la revue *Scientific Reports* en 2017 [MUGGI 17].

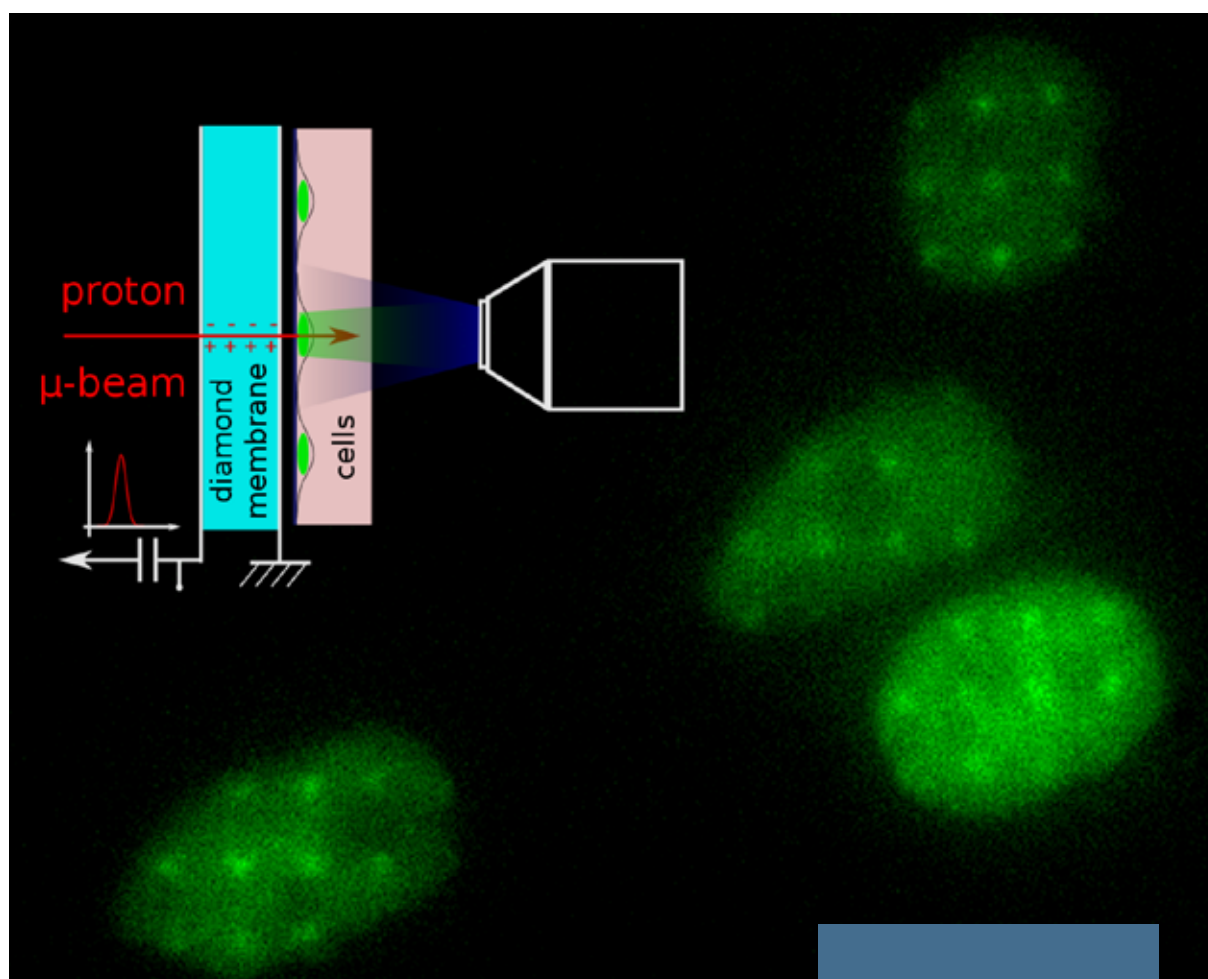
En parallèle de ces travaux et en collaboration avec l'université de Munich dans le cadre du programme SPRITE, nous avons réalisé des irradiations sélectives d'organelles cellulaires (mitochondries) en dose contrôlée et évalué en temps réel la réponse radio-induite de ces mitochondries et plus particulièrement leur potentiel de membrane ($\Delta\psi$) à l'aide de marqueurs fluorescents TMRE. Cette étude a permis de mettre en évidence dans la minute qui suit l'irradiation une dépolarisation mitochondriale radio-induite extrêmement localisée au site d'irradiation. Ce travail a été publié dans la revue *Scientific Reports* [WALS 17].

Enfin, nous avons poursuivi le développement d'un code Monte Carlo basé sur Geant4 intégrant l'ensemble des paramètres de l'expérience de la physique à la biologie avec l'intégration de fantômes biologiques "réalistes" afin de réaliser le calcul de l'énergie déposée dans les zones spécifiquement irradiées. Ainsi, le calcul de l'énergie déposée par des protons (3 MeV) dans un noyau de fantômes numériques "réalistes" basés sur l'utilisation de reconstructions tridimensionnelles d'embryons obtenues par microscopie confocale a été confronté aux données expérimentales. Les différents stades de division cellulaire au cours du développement embryonnaire de *C. elegans* ont été numérisés et intégrés dans Geant4. La sélection de lignées transgéniques d'intérêt autorisant l'irradiation sélective de compartiments subcellulaires ou cellulaires particulier et/ou le suivi des dommages radio-induits en temps réel (dommages à l'ADN) a permis de détecter et de suivre en temps réel dans un organisme en développement les conséquences radio-induites précoces (approche *in vivo*). Ce travail a été publié dans la revue *Scientific Reports* en 2019 [TORF 19].

Ces différents travaux ont bénéficié de financements du programme européen SPRITE (Initial Training Network Marie Curie), du Défi "Instrumentation aux limites" de la MITI du CNRS, du programme NEEDS (projet Echos en collaboration avec l'équipe de C. Lecomte-Pradines de l'IRSN), du programme Physique Cancer INSERM (Collaboration CEA-List) et du programme CNRS 80'PRIME (RADIANCE).

Calcul de l'énergie déposée dans une région micro-irradiée d'un fantôme biologique "réaliste". Irradiation réalisée à l'aide d'un microfaisceau de proton de 3 MeV (AIFIRA/CENBG) [TORF 19].





Cell micro-irradiation
with MeV protons
counted
by an ultra-thin
diamond membrane
[BARB17]

- (1) Cursus Master en Ingénierie (CMI)
"Physique: Rayonnements et Instrumentation" - P. Barberet, depuis 2016
- (2) Master "Instrumentation Nucléaire" - C. Michelet, depuis 2009
- (3) <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.978887>
- (4) Supporting Postgraduate Research with Internships in industry and Training Excellence
- (5) Plateforme Optique Physique pour la Radiothérapie
- (6) Walsh and G. Dollinger, Institut für Angewandte Physik und Messtechnik, Universität der Bundeswehr München
- (7) Supporting Postgraduate Research with Internships in industry and Training Excellence

- [ALLI16] J. Allison et al., Nucl. Instr. Meth. A 835, 186 (2016)
 [BARB15] P. Barberet et al., Radiat Prot Dosimetry 166, 182 (2015)
 [BERN15] M. A. Bernal et al., Phys. Med. 31, 2015, 861-874 (2015)

- [BARB17] P. Barberet et al., Appl. Phys. Lett. 111, 243701 (2017)
 [COUS19] G. Coussot et al., Astrobiology 19, 1063 (2019)
 [DEVE15] G. Devès et al., Nucl. Instr. Meth. B 348, 62 (2015)
 [INCE18] S. Incerti et al., Med. Phys. 45, e722 (2018)
 [LETR15] Q. Le Trequesser et al., Journal of Chemical Biology 8, 159 (2015)
 [MICH15] C. Michelet et al., Nucl. Instr. Meth. B 363, 55 (2015)
 [MICH17] C. Michelet et al., Conf. Nucl. Microprobe Technology and Applications, Nucl. Instr. Meth. B 404, 131 (2017)
 [MICH19] C. Michelet C et al., Phys Med. 65, 172 (2019)
 [MUGGI17] G. Muggiolu et al., Sci Rep. 7, 41764 (2017)
 [MUGGI18] G. Muggiolu et al., Exp. 2018 Feb 3;(132). doi: 10.3791/55041.
 [SIMO17] M. Simon et al., Nanotoxicology 11, 134 (2017)
 [TORF19] E. Torfeh et al., Sci Rep. 22, 10568 (2019)
 [WALS17] D.W.M. Walsh et al., Sci. Rep. 7, 46684 2017)

NEUTRINO



ABSTRACT

neutrino group at CENBG works on the study of neutrino oscillation as well as on the determination of the neutrino mass nature searching for the so-called neutrinoless double beta-decay.

The discovery of neutrino oscillation demonstrated that neutrino are massive particles and that the minimal Standard Model needs to be extended. To better describe this phenomenon several parameters have to be measured, in particular it was critical to know if the mixing angle θ_{13} was different from zero allowing for a possible CP violation in the leptonic sector. The group was involved in the Double Chooz experiment which for the first time gave indication for a nonzero value of such a mixing angle. Another unknown is the so-called mass hierarchy which is one of the goals of the JUNO experiment in which the group is strongly involved. Antineutrino reactors will be detected by a 20 kton liquid scintillator detector with an excellent energy resolution which will be able to cast light on mass hierarchy and measure with a precision better than 1% the solar oscillation parameters.

Neutrinoless double-beta decay search is a major activity of the group since the beginning. The observation of such a process would demonstrate a leptonic number violation. The group was leader in the NEMO-3 experiment with a long-standing experience on low radioactivity techniques and leads now the SuperNEMO experiment. In addition, R&D efforts are ongoing for future possible detector such high pressure gas TPC (R2D2) and opaque liquid scintillator detectors (LiquidO).

RÉSUMÉ

découverte du phénomène d'oscillations. Le groupe Neutrino du CENBG travaille sur les oscillations de neutrinos et sur la détermination de la nature de la masse du neutrino via la recherche de la désintégration double bêta sans émission de neutrinos.

La découverte des oscillations de neutrinos a démontré que les neutrinos sont des particules massives et que le Modèle Standard de la physique des particules doit être élargi. Pour mieux décrire ce phénomène plusieurs paramètres doivent être mesurés, en particulier il était important de savoir si l'angle de mélange θ_{13} était différent de zéro pour pouvoir aller chercher une possible violation de CP dans le secteur leptonique. Le groupe était impliqué dans l'expérience Double Chooz qui a donné la première indication d'une valeur non nulle de cet angle. Une autre inconnue est la hiérarchie de masse qui est un des objectifs de l'expérience JUNO au sein de laquelle le groupe est très investi. Les anti-neutrinos des réacteurs nucléaires seront observés dans un détecteur de 20 kilo-tonnes de scintillateur liquide avec une très haute résolution en énergie de façon à discriminer la hiérarchie de masse et à réaliser des mesures de précision meilleure que 1% sur les paramètres solaires de l'oscillation. La recherche de la désintégration double bêta est une activité majeure du groupe depuis sa création et son observation démontrerait la violation du nombre leptonique. Le groupe a eu un rôle prépondérant dans l'expérience NEMO-3 bénéficiant d'une grande expertise sur les techniques de faible radioactivité et il est en charge actuellement de l'expérience SuperNEMO. Par ailleurs des efforts de R&D sont en cours pour le développement de futurs détecteurs pour la recherche de la désintégration double bêta comme une TPC gazeuse à haute pression (R2D2) et des détecteurs à scintillateur liquide opaque (LiquidO).

Neutrino physics is a key topic in particle physics and was awarded the Nobel prize in 2015 for the discovery of oscillations. The

PERMANENTS

Cédric CERNA
Emmanuel CHAUVEAU
Philippe HUBERT
Cécile JOLLET
Christine MARQUET
Anselmo MEREGAGLIA
Frédéric PERROT
Fabrice PIQUEMAL
Michael PRAVIKOFF

POST-DOCTORANTS

Jocelyn DOMANGE
Miroslav MACKO

DOCTORANTS

Clément BORDEREAU
Arnaud HUBER
Kenny KALE SAYI
Maxime KARST
Miroslav MACKO
Veronika PALUSOVA
Axel PIN
Ramon SALAZAR

CHERCHEUR INVITÉ

Viktor TIMKIN

CDD

Jean JOUVE

Depuis deux décennies, la physique du neutrino a produit des découvertes majeures et a apporté un prix Nobel de physique en 2015 pour la découverte des oscillations de neutrinos qui démontre que les neutrinos ont une masse.

La compréhension et la description du phénomène d'oscillation ainsi que la recherche de la masse et de la nature du neutrino au travers en particulier de la recherche de la désintégration double bêta sans émission de neutrinos sont les activités de recherche du groupe Neutrino.

La découverte des oscillations des neutrinos a montré que le Modèle Standard Minimal de la physique des particules est incomplet et qu'il requiert des extensions. Pour décrire au mieux ce phénomène, plusieurs paramètres (angle de mélange, différences de masse des neutrinos) doivent être déterminés. Ainsi des expériences dédiées sont réalisées pour lesquelles des conditions sur la distance entre source de neutrinos et détecteur ainsi que sur l'énergie des neutrinos doivent être remplies. Le groupe a été impliqué dans le projet Double Chooz qui avait pour objectif de mesurer l'angle de mélange θ_{13} en étudiant les neutrinos émis par des réacteurs nucléaires. La mesure réalisée a démontré que cet angle est non nul ce qui a permis de dimensionner les futurs projets pour la recherche de la hiérarchie de masse ainsi que pour la violation de la symétrie CP dans le secteur leptonique ainsi que pour la hiérarchie de masse. Cette dernière inconnue est un élément majeur de la physique des particules puisqu'il pourrait expliquer l'asymétrie matière-antimatière de l'univers. La prise de données de Double Chooz ayant eu lieu de 2011 à 2018, des travaux d'analyse ont été développés par le groupe pour atteindre un tel résultat.

Le groupe est fortement impliqué dans le projet JUNO qui étudie aussi les neutrinos émis par des réacteurs nucléaires en Chine. La distance source-détecteur permet d'étudier plusieurs propriétés du phénomène d'oscillation : en particulier l'ordre des masses des neutrinos (hiérarchie de masse) et la mesure de précision de plusieurs paramètres d'oscillation. Le détecteur JUNO requiert des développements techniques spécifiques pour atteindre une excellente résolution en énergie, jamais réalisée pour un détecteur d'une telle taille (cible de 20 000 tonnes). JUNO permettra aussi d'être sensible à de nombreux autres pans de la physique des particules : détection des neutrinos solaires, géo-neutrinos, supernova et durée de vie du proton. Les connaissances supplémentaires qu'apportera l'expérience JUNO permettront de mener à bien les futurs projets sur la recherche de la violation de CP.

La recherche du processus $\bar{\nu}\nu$ est une activité majeure du groupe depuis le début de sa création. Les expériences recherchant un tel processus sont les seules qui permettront de dévoiler la nature Majorana du neutrino. D'une façon plus générale, l'observation de ce processus implique une violation du nombre leptonique, il est aussi très dépendant de l'ordre des masses des neutrinos recherché par JUNO.

Le groupe bénéficie d'une grande expertise sur la recherche de ce processus via la méthode alliant calorimétrie et trajectographie développée pour les expériences NEMO.

Suite au détecteur NEMO3 ayant permis de mesurer des durées de vie du processus permis double bêta avec émission de neutrino ($\bar{\nu}\nu$) et de mettre des limites sur le processus $\bar{\nu}\nu$ pour plusieurs isotopes, le groupe a développé le module démonstrateur SuperNEMO. Le groupe s'est investi sur deux points particuliers : le calorimètre pour lequel des développements spécifiques ont permis d'atteindre une résolution de 8% FWHM à 1 MeV et des mesures de faibles radioactivités avec pour objectif de ne pas dépasser 2 $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{208}Tl , 10 $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{214}Bi pour les feuilles sources et 0,15 mBq/m³ pour le radon à l'intérieur du détecteur.

La prise de données avec le module démonstrateur SuperNEMO permettra de mettre des limites compétitives sur la décroissance $\bar{\nu}\nu$ du ^{82}Se .

Pour atteindre des détecteurs utilisant une tonne d'isotopes candidats à l'émission $\bar{\nu}\nu$, des développements techniques sont en cours d'exploitation dans le groupe : utilisation de TPC gazeuse avec faible quantité de matériaux pour atteindre un très bas bruit de fond (R2D2), utilisation de liquides scintillants opaques permettant de déployer de grandes quantités d'isotopes (LiquidO).

1 Motivations Scientifiques

La recherche de la décroissance double bêta sans émission de neutrinos est un axe de recherche majeur pour révéler certaines propriétés du neutrino : son observation impliquerait en effet que le neutrino est une particule de Majorana tout en apportant des contraintes sur la masse absolue et la hiérarchie de masse des neutrinos, indépendamment des expériences d'oscillation ou de mesure de masse directe (étude du spectre en énergie bêta) ou indirecte (cosmologie).

Il s'agit d'une décroissance radioactive interdite par le Modèle Standard et de nombreux mécanismes théoriques peuvent produire les décroissances $\beta\beta 0\nu$ tel l'échange d'un neutrino léger, courant droit, SUSY, émission d'un boson Majoron, etc. sans prédiction sur le mécanisme le plus favorable.

C'est dans ce contexte que l'équipe Neutrinos du CENBG contribue aux expériences NEMO-3 et SuperNEMO en déployant une technologie unique de détection : l'utilisation d'émetteurs $\beta\beta$ en fine feuille placée dans un trajectographe et entourée d'un calorimètre segmenté (figure 1).

Un tel dispositif expérimental permet d'identifier la trace des deux électrons et de mesurer la décroissance $\beta\beta$ sous plusieurs observables (l'énergie totale des deux électrons, leur énergie individuelle et leur corrélation angulaire) tout en laissant la possibilité d'utiliser différents isotopes.

chambre
contenant
30 PM 8" de
SuperNEMO



2 NEMO-3

Le détecteur NEMO-3 a pris des données au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) de 2003 à 2011.

Le groupe a contribué à la production et à l'analyse des données (pilotage de la prise de données, étalonnages, contrôle et bilan radiopureté, simulations des bruits de fond et outils d'analyse) pour la recherche des décroissances $\beta\beta 2\nu$ et $\beta\beta 0\nu$ des différents isotopes présents dans le détecteur.

L'analyse finale de la recherche de la décroissance $\beta\beta 0\nu$ du molybdène 100 a été publiée en 2015 [Arno15]. L'étude détaillée des différents cas de physique autour de la décroissance $\beta\beta 2\nu$ de cet isotope a donné lieu à une publication en 2018 [Arno18].

La recherche des désintégrations $\beta\beta 2\nu$ et $\beta\beta 0\nu$ du sélénium-82 vers l'état fondamental du krypton-82 a été publiée en 2018 [Mott18]. L'analyse vers l'état excité 22^+ a été faite dans le cadre de la thèse de Benjamin Soulé (soutenue en 2015). Dans ce canal de désintégration où l'on attend 2 électrons et 2 gamma, l'énergie disponible ($Q_{\beta\beta} - E^*$) pour les 2 électrons n'est plus que de 1500 keV et est donc très sensible aux bruits de fond. Après une étude détaillée de l'impact des bruits de fond interne et externe dans ce canal d'analyse à l'aide d'un outil innovant de traçage gamma (développé par le groupe), une limite supérieure de $1,3 \cdot 10^{21}$ ans a pu être obtenue sur le processus $\beta\beta 2\nu$ du ^{82}Se vers l'état excité du ^{82}Kr pour la première fois avec l'ensemble de la cinématique électrons et gamma et une exposition de 4,37 kg.an. Cette analyse a pu montrer la contribution non négligeable du bruit de fond externe à hauteur de 21% du total et souligner que, dans le cadre de SuperNEMO, le bruit de fond externe principalement issu du ^{214}Bi dans les PM doit être minimisé.

D'autres articles ont été publiés pour le ^{48}Ca [Arno16], ^{150}Nd [Arno16b] et ^{116}Cd [Arno17]. Pour le néodyme-150, l'accès aux traces des électrons a permis, pour la première fois, de mettre une limite sur le processus de décroissance quadruple bêta (autorisée pour les neutrinos de Dirac) [Arno17b].

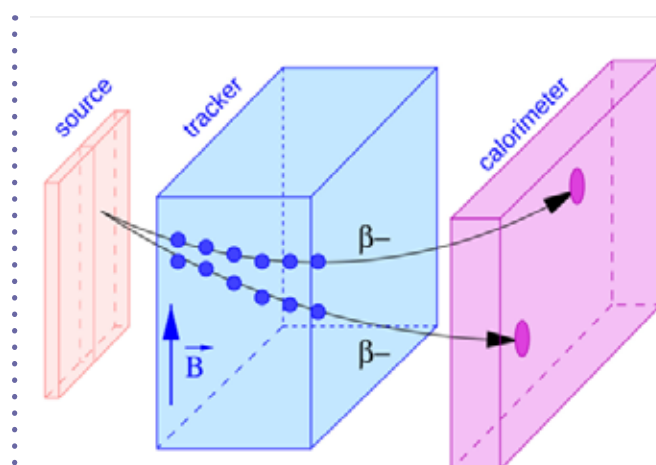


FIGURE 1

PrincipeNEMO : Principe de la technique de détection tracko-calorimétrique des détecteurs NEMO

Gestion du projet

Entre 2015 à 2019, l'équipe a fortement été impliquée dans la gestion du projet SuperNEMO, avec notamment les postes clés suivants :

- Porte-parole international de la collaboration (F. Piquemal puis C. Marquet à partir de janvier 2018)
- Coordination technique intégration (C. Cerna jusqu'à fin 2017)
- Responsable faibles radioactivités (F. Perrot)
- Responsable de l'analyse (E. Chauveau)
- Responsable du calorimètre (C. Marquet jusqu'à fin 2017)

Construction et intégration du calorimètre

En 2014 et 2015, l'équipe est entrée dans une phase de production des 520 modules optiques constituant les deux murs principaux du calorimètre : réception des scintillateurs et des photomultiplicateurs, leur préqualification sur banc de test, assemblage (collage optique et habillage), caractérisation complète sur faisceau d'électrons (gain, résolution en énergie, linéarité, homogénéité de la face d'entrée).

Cette production a démontré la reproduction des performances atteintes lors de la R&D à savoir une résolution en énergie de l'ordre de 8% FWHM pour des électrons de 1 MeV (*figure 2*). La R&D et les procédures de qualification ont fait l'objet de plusieurs travaux de thèse dans le groupe dont ceux de Arnaud Hubert (thèse soutenue en 2017) et de la publication d'un article en 2017 [Bora17].

Fin 2015 et en 2016, les 520 modules optiques préassemblés sous forme de brique de 4 x 2 modules ont été progressivement acheminés au LSM pour l'assemblage des deux murs principaux du calorimètre par des techniciens, ingénieurs et chercheurs du laboratoire.

Mise en route du calorimètre

L'équipe a depuis contribué aux dernières étapes d'intégration du calorimètre, à savoir câblage, étanchéité à la lumière, installation et test de l'électronique, afin de débiter les premiers tests de "commissioning". Ainsi, trois campagnes de données ont été prises en 2018 et 2019. Les analyses effectuées par l'équipe se focalisent particulièrement sur la caractérisation des modules optiques du calorimètre : taux de comptage, stabilité, étalonnage en énergie, suivi temporel... (*figure 3 et 4*).

Faibles radioactivités

Dans le cas du sélénium-82, isotope candidat principal pour SuperNEMO, l'énergie de la désintégration est de l'ordre de 3 MeV. Ainsi, les deux principaux radionucléides capables de mimer un événement double bêta (2 électrons issu d'un même vertex) sont le bismuth-214 et le thallium-208 issus des chaînes radioactives naturelles de l'uranium-238 et du thorium-232 respectivement. Ces "polluants" peuvent se trouver en volume dans les matériaux tels que les sources $\beta\beta$ mais aussi venir contaminer l'intérieur du détecteur, notamment le trajectographe, à cause du radon (^{222}Rn), un gaz rare radioactif situé dans la chaîne radioactive de ^{238}U . Les travaux du groupe ont porté sur plusieurs axes pour améliorer le bruit de fond du démonstrateur de SuperNEMO et démontrer la faisabilité d'une expérience dite "zéro" bruit de fond.

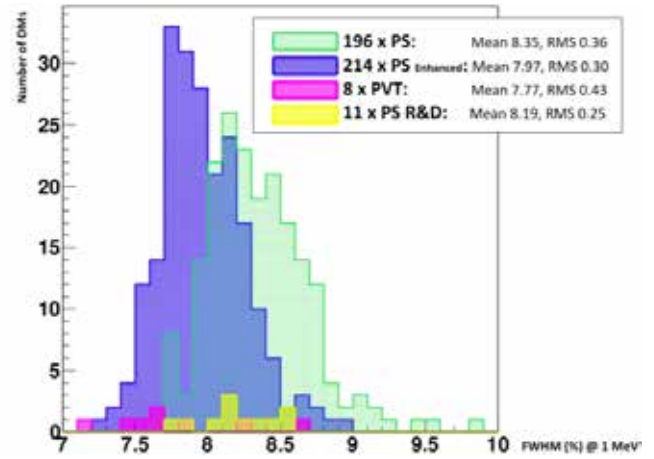


FIGURE 2

FWHMSN : Résolutions en énergie (FWHM à 1 MeV) mesurés sur l'ensemble des modules optiques 8 pouces du démonstrateur SuperNEMO. Plusieurs lots de scintillateurs de différentes compositions, correspondant aux différentes couleurs, ont été utilisés.

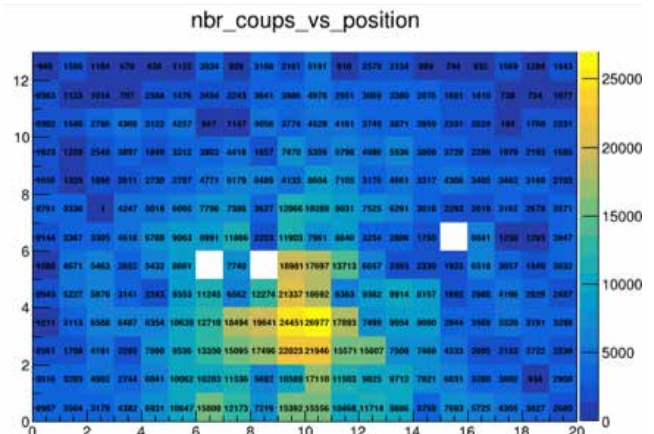


FIGURE 3

SNCOM : Taux de comptage (unité arbitraire) des modules optiques d'un des deux murs du calorimètre exposé à une source de cobalt-60

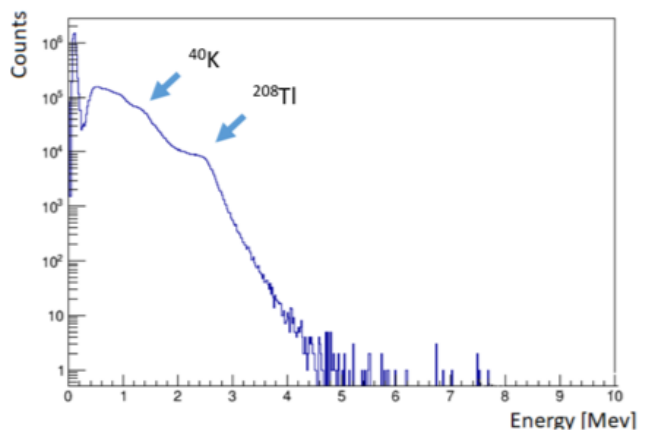


FIGURE 4

SNCOM : Spectre en énergie type du bruit de fond radioactif mesuré par les modules optiques

Détecteur BiPo

Le groupe a été impliqué dans la sélection et la validation des matériaux par spectrométrie gamma et émanation radon du détecteur BiPo3 dédié à la qualification des feuilles sources de SuperNEMO ainsi que dans la caractérisation d'échantillons de référence (feuille d'aluminium) pour valider son efficacité. Ce détecteur, en opération depuis 2013 au Laboratoire Souterrain de Canfranc, a démontré sa capacité à atteindre une sensibilité requise de $2 \mu\text{Bq/kg}$ pour des feuilles de ^{82}Se de $3,6 \text{ m}^2$ en 6 mois de mesure. BiPo3 a ainsi pu qualifier une partie des feuilles de sélénium-82 du démonstrateur de SuperNEMO entre 2013 et 2017 [Bara17].

Contrôle de la radiopureté des matériaux de SuperNEMO par spectrométrie gamma

Le retour d'expérience de NEMO-3 avait montré que le verre du PM était le matériau dominant du bruit de fond externe de par sa teneur en ^{40}K , ^{214}Bi et ^{208}Tl . Il était donc important d'améliorer la pureté radioactive du verre des PM et de la contrôler pendant la production. Une étude des verres et des isolants sur 10 lots de production représentatifs de la majorité des 440 PM 8'' produits par la société Hamamatsu a été réalisée et a permis de montrer que les niveaux de radiopureté requis pour le verre de SuperNEMO avaient été atteints et améliorés par rapport à NEMO-3, exceptés pour le ^{208}Tl . Ces résultats permettent d'établir une carte de la radioactivité induite par les PM en fonction de leur localisation dans le détecteur et de réaliser des simulations plus précises pour estimer l'impact du bruit de fond externe dû aux PM sur la désintégration double bêta avec et sans neutrino. Les contraintes de radioactivité pour chaque matériau ont ainsi été définies par rapport à sa position dans le détecteur, à sa masse totale et à son activité par rapport à celle des PM. Au total, près de 300 échantillons ont été mesurés par spectrométrie gamma puis sélectionnés ou rejetés pour entrer dans la composition du démonstrateur de SuperNEMO, dont plus de 95% ont été mesurés sur l'une des 2 plateformes gérées par l'équipe du CENBG, à PRISNA et au LSM.

Contrôle du radon

Lors de la R&D SuperNEMO, le groupe du CENBG s'est doté d'un dispositif ultra-sensible d'émanation du radon par l'association d'une chambre de 700 L en acier électro-polé contenant l'échantillon de grand volume à qualifier à un détecteur de Radon de type électrostatique de 70 L permettant une mesure des descendants du ^{222}Rn . Nous avons effectué plusieurs développements (caractérisation des bruits de fond intrinsèques et étalonnage en efficacité de l'ensemble du dispositif). Suite à des développements, une sensibilité unique dans la collaboration de 40 atomes de radon/ m^2 /jour pour un échantillon de 10 m^2 de surface a pu être atteinte. Ce dispositif a permis de vérifier pendant la phase de construction du démonstrateur l'émanation en radon de matériaux critiques tels que les cellules Geiger, la feuille de nylon isolant le trajectographe du calorimètre ou les PM 8'' (figure 5). Ces mesures et leurs interprétations ont fait partie du travail de thèse de Benjamin Soulé soutenue en 2015 [Cern15].

Par ailleurs, en 2004, un dispositif permettant de purifier le radon de l'air avant de l'injecter autour des différentes expériences du LSM dont NEMO3 avait été mis en place jusqu'en 2014. Ce dispositif, composé d'une colonne verticale de 2,6 m de charbon actif refroidie à -55°C permettant d'adsorber les gaz inertes comme le Radon a fait d'objet d'une étude originale afin de comprendre a posteriori le profil de piégeage du radon en fonction de l'épaisseur de charbon actif traversé par la mesure du plomb-210 en utilisant la spectrométrie gamma. Cette étude publiée en 2019 [Hoda19] a permis de confirmer un libre parcours moyen du Radon de l'ordre de 29 cm dans cette colonne compatible avec une diminution de plus de 3 ordres de grandeur de l'activité du radon dans l'air entre l'entrée (20 Bq/m^3) et la sortie ($\sim 0,01 \text{ Bq/m}^3$) de la colonne de charbon actif. Ce travail

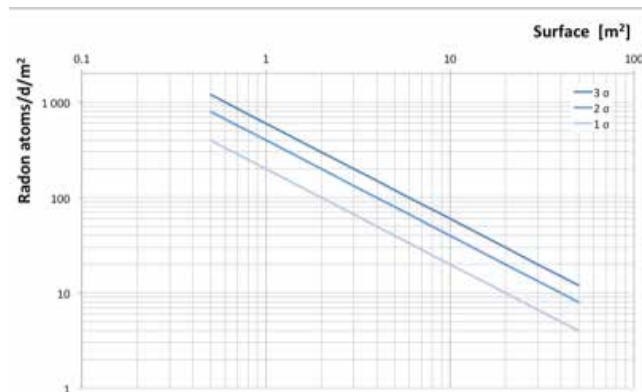


FIGURE 5

Sensibilité du dispositif en fonction de la surface de l'échantillon

ouvre la voie au développement de futures usines anti-radon permettant de délivrer de l'air au niveau de quelques mBq/m^3 en radon.

Simulation & Analyse

En parallèle, un effort croissant a été réalisé sur les simulations et la préparation à l'analyse de SuperNEMO. Les simulations optiques (figure 6), une contribution phare de l'équipe de Bordeaux dans SuperNEMO, permettent de modéliser la propagation et le devenir des photons optiques dans les scintillateurs.

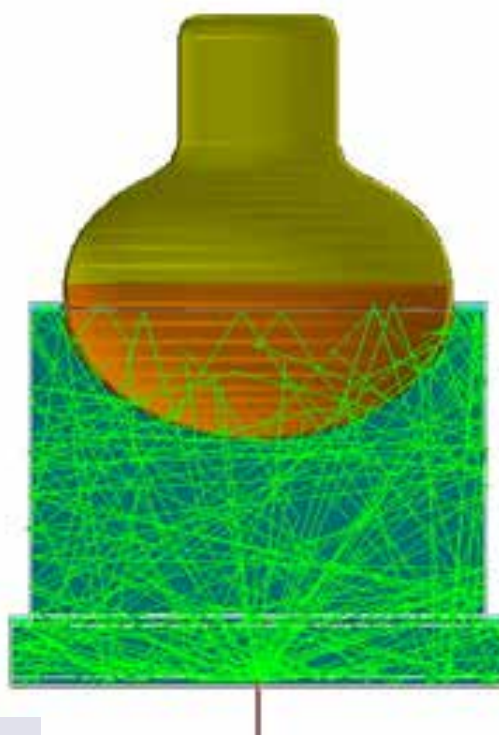


FIGURE 6

Aperçu de la simulation de la propagation des photons de scintillation dans un module optique de SuperNEMO

Une importante étape a consisté en l'implémentation de la saturation Birks de la scintillation ainsi que la production de lumière par effet Tcherenkov. L'introduction de ces deux effets dans la simulation permet de rendre compte de la non-linéarité de la réponse des scintillateurs. L'effet de la géométrie des scintillateurs (de plus grandes tailles que NEMO-3) sur la collection de la lumière en fonction du lieu d'interaction a également été modélisé. Ces différentes corrections sont devenues nécessaires pour maîtriser la réponse du calorimètre dont la résolution en énergie a été améliorée par rapport à NEMO-3. La **figure 7** illustre l'amélioration de l'accord entre données et simulations apportées par ces corrections. Ce travail a fait l'objet de la thèse d'Arnaud Huber ^[Hube17] et se poursuit dans le cadre de celle d'Axel Pin (débutée en 2017).

Depuis 2015, l'équipe a repris les activités de simulation des bruits de fond externes liés aux neutrons et aux gammas de haute énergie provenant de la radioactivité de la roche ou produits par rayonnement cosmique. Ces simulations ont permis de finaliser le choix des différentes épaisseurs des blindages du démonstrateur (eau, polyéthylène, fer). Le bruit de fond neutron a été étudié dans le cadre de la thèse de Miroslav Macko (soutenue en 2018) ^[Mack18]. Le bruit de fond gamma fait l'objet des travaux de la thèse de Veronika Palusova (débutée en 2018).

2

EXPÉRIENCE JUNO

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory) est une expérience localisée en Chine qui se propose d'étudier de nombreux aspects de la physique du neutrino. Son objectif principal est de déterminer la hiérarchie de masse des neutrinos avec une sensibilité de $3-4\sigma$ en 6 ans de prise de données en détectant les antineutrinos émis par des réacteurs nucléaires situés à 53 km. Le choix du site de JUNO a été optimisé pour placer le détecteur au maximum de l'oscillation mais également pour favoriser un emplacement en site souterrain à 700 m de profondeur. La construction du détecteur lui-même va s'étaler entre 2018 et 2021 avec un début de prise de données prévu fin 2021.

JUNO consiste en un détecteur central sphérique composé d'une sphère en acrylique de 35 m de diamètre et remplie de 20 000 tonnes de liquide scintillant de type LAB. La sphère constitue la cible pour les antineutrinos. Elle sera plongée dans une piscine d'eau pure de forme cylindrique de 40 mètres de hauteur et 40 mètres de diamètre permettant de réaliser ainsi un blindage contre la radioactivité de la roche mais également de détecter les muons par effet Tcherenkov. Enfin, un module appelé Top Tracker (issu de l'expérience OPERA) sera placé au-dessus de la sphère pour identifier et rejeter les muons cosmiques avec une grande efficacité. Une vue schématique du détecteur est illustrée sur la **figure 8**.

Pour détecter la lumière de scintillation avec une résolution en énergie de 3% à 1 MeV, JUNO utilisera environ 17 500 PM de taille 20 pouces (appelé LPMT pour Large PMT) capables de collecter en moyenne 1 200 photoélectrons (PE) par MeV. Une telle quantité de PE inégale peut induire des effets non stochastiques qui peuvent détériorer la résolution en énergie avec les PM 20'', notamment liés à la non-linéarité de leur réponse en fonction de l'énergie déposée et donc du degré d'illumination d'un PM. Ces effets non stochastiques doivent avoir une contribution totale inférieure à 1% dans JUNO ce qui est un challenge énorme pour un détecteur de cette taille. C'est pourquoi un deuxième système de photo-détecteurs composés de 25 600 PM de 3''

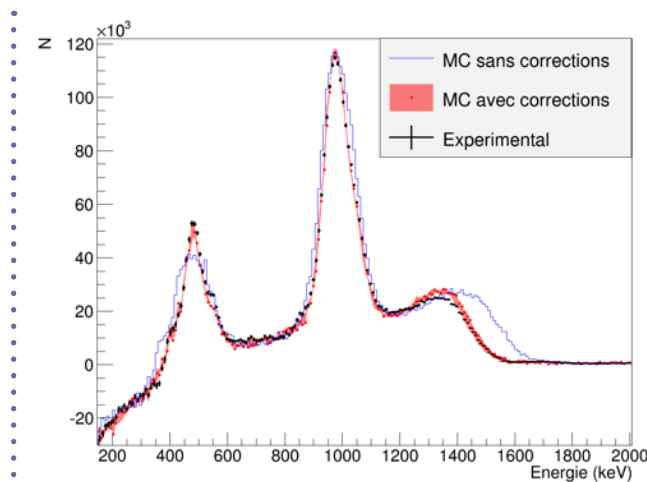


FIGURE 7

Spectre en énergie des électrons du ^{207}Bi obtenus avec un compteur de SuperNEMO par la mesure (noir) ainsi que par les simulations avec (rouge) et sans (bleu) les corrections en énergie [Hube17]

de diamètre (appelé SPMT pour Small PMT) a été conçu afin de fonctionner dans un régime d'illumination totalement différent des grands PM. En effet, ils fonctionneront le plus souvent dans un mode "photoélectron unique" (0 ou 1 photon détecté par PM), permettant une mesure simple de l'énergie déposée, et posséderont donc une dynamique réduite servant éventuellement à corriger les non-linéarités des PM 20''. L'utilisation combinée des PM 20'' et des PM 3'' pour mesurer l'énergie déposée par les neutrinos permettra d'améliorer la réponse en énergie du détecteur pour la détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos.

Le groupe du CENBG, membre de l'expérience JUNO depuis 2016, est fortement impliqué dans trois activités de premier plan :

- le développement des simulations et la préparation de l'analyse des données
- le système des photomultiplicateurs 3 pouces (SPMT) et son électronique de lecture associée
- la caractérisation des matériaux critiques du détecteur en termes de radioactivité

Le CENBG a pris également plusieurs responsabilités dans l'expérience :

- co-responsable scientifique SPMT (co-PI) (C. Cerna depuis 2019)
- coordination technique internationale du système SPMT (C. Cerna en 2016-2019)
- coordination des simulations de physique SPMT (F. Perrot en 2017-2018 et C. Jollet depuis 2019)
- membre de l'Executive Board de JUNO depuis mi-2018 (F. Perrot)
- czar de JUNO France auprès du CC IN2P3 depuis 2015 (A. Meregaglia)

1 Simulations Numériques

Le groupe est fortement impliqué dans le développement des simulations et la préparation de l'analyse des données. L'interaction d'un antineutrino électronique se fait par la réaction bêta inverse générant un positron et un neutron. Pour simuler au mieux le positron, le groupe a écrit pour la collaboration JUNO un générateur d'ortho-positronium. Ce nouveau générateur permet de simuler avec précision la création et la décroissance des états de positronium. Une étude de sensibilité sur l'observation de

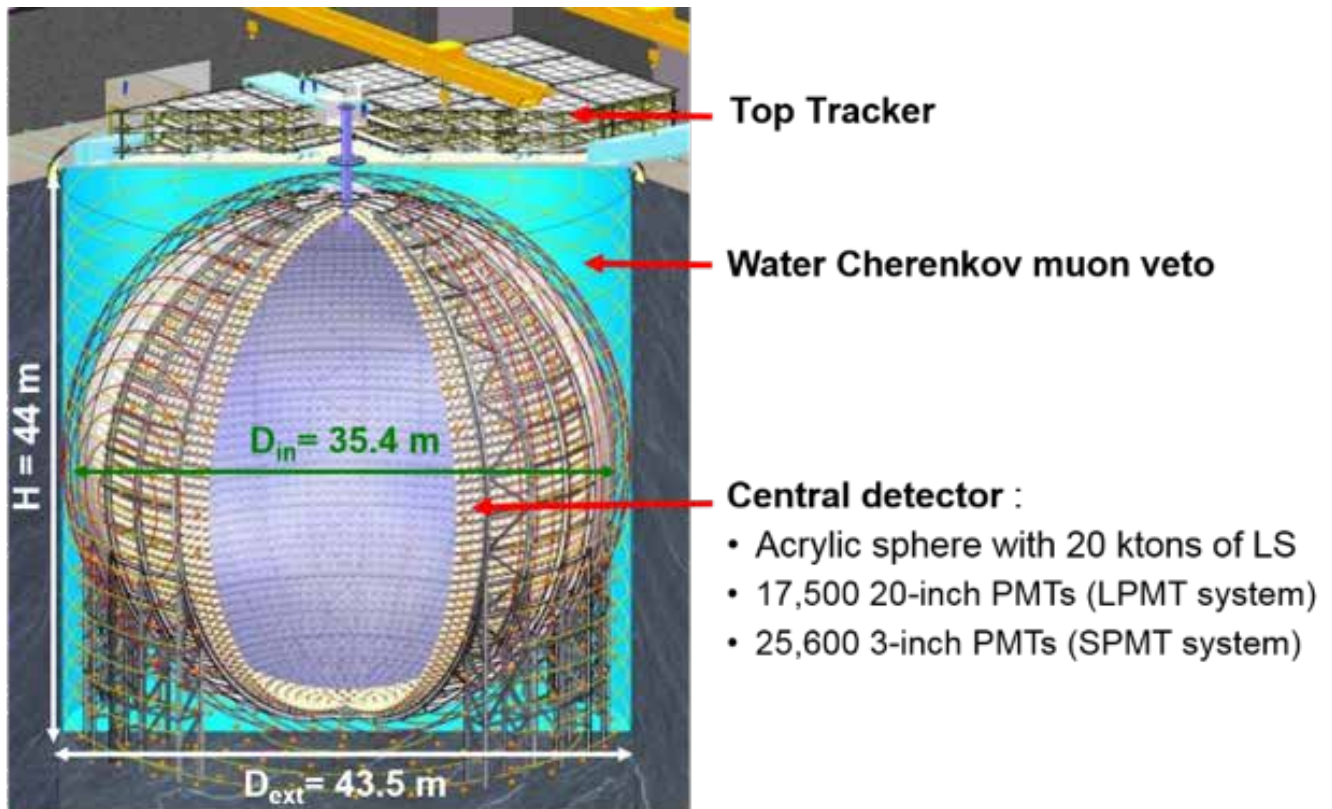


FIGURE 8 Vue schématique du détecteur JUNO

l'ortho-positronium via la réponse temporelle des signaux pouvant permettre de créer un échantillon sans bruit de fond de neutrinos a été réalisée. La **figure 9** illustre la réponse temporelle d'un signal d'ortho-positronium simulé dans JUNO avec l'ajustement montrant l'ionisation du positron et son annihilation retardée.

Le bruit de fond le plus complexe des expériences auprès des réacteurs nucléaires est celui induit par les noyaux cosmogéniques ^9Li et ^8He . Leur longue durée de vie va imposer un long veto en temps après le passage des muons induisant une réduction de l'efficacité. Les caractériser au mieux permettra de réduire cette inefficacité et aussi de déterminer le taux de bruit de fond restant dans l'échantillon final. Le groupe a développé et mis à disposition

de la collaboration un générateur pour simuler les désintégrations des noyaux ^9Li et ^8He . Une description précise des modes de décroissance de ces noyaux a été nécessaire pour déterminer le spectre de ce bruit de fond et étudier la possibilité de le discriminer via une identification des particules. Ce générateur a été développé au sein du logiciel GEANT4 pour qu'il soit accessible à une plus large communauté. La **figure 10** illustre le spectre émis de bruit de fond des noyaux cosmogéniques déterminé par le générateur développé par le groupe, une comparaison est faite avec le spectre mesuré par Double Chooz et par celui simulé par GEANT4 sans aucune modification.

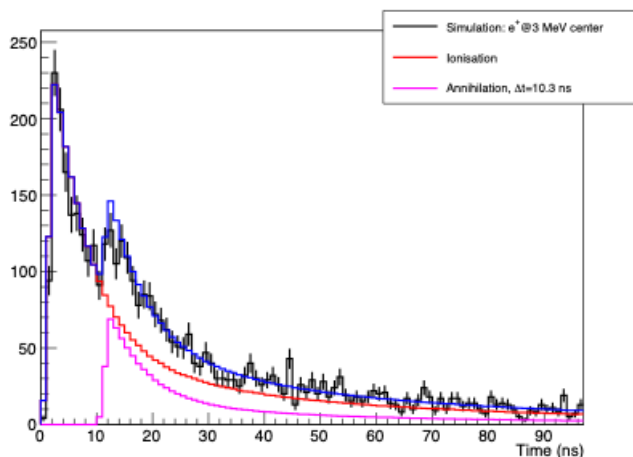


FIGURE 9 Réponse temporelle d'un ortho-positronium simulé dans JUNO avec ajustement (ionisation et annihilation retardée).

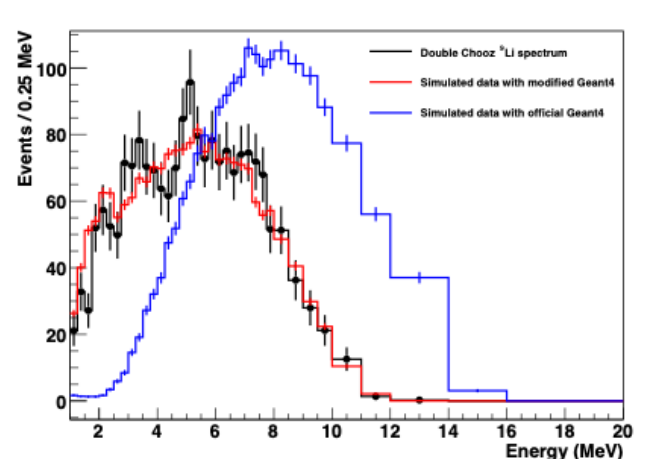


FIGURE 10 Comparaison entre le spectre en énergie des décroissances du ^9Li obtenue avec GEANT4 standard (bleu), GEANT4 utilisant nos modifications (rouge) et le spectre publié de Double Chooz (noir).

2 Développement du système SPMT et son électronique associée

Le groupe du CENBG est fortement impliqué dans le système SPMT car il en assure notamment la coordination technique au niveau international. Au niveau du système SPMT, il est prévu de déporter l'électronique de lecture des PM 3" dans une boîte de jonction immergée contenant les cartes d'électronique des PM 3" (**figure 11**). Afin d'optimiser la lecture de ces PM qui fonctionneront en mode photoélectron unique, il a fallu concevoir et réaliser une carte de lecture frontale appelée ABC (Asic Battery Card) composée de 8 ASIC Catiroc capable de numériser les signaux issus des 128 PM (**figure 12**).

Cette partie de l'électronique de lecture est entièrement sous la responsabilité de l'IN2P3 avec la participation de plusieurs laboratoires français (APC/LAL, CENBG, OMEGA et SUBATECH). En particulier, le service électronique et acquisition du CENBG a entièrement assuré le développement, le routage, la fabrication et les tests des prototypes la carte électronique ABC. Au niveau du groupe Neutrino du CENBG, à travers la thèse de Clément Bordereau (2017-2020), nous avons fortement contribué à la caractérisation complète des prototypes V0 des cartes frontales (mesure des piédestaux, seuil de déclenchement, linéarité en charge, résolution en temps, diaphonie inférieure à 0,1%) qui vont être utilisés en 2020 pour la caractérisation des 25 600 PM 3" produits par la compagnie HZC en Chine avant intégration

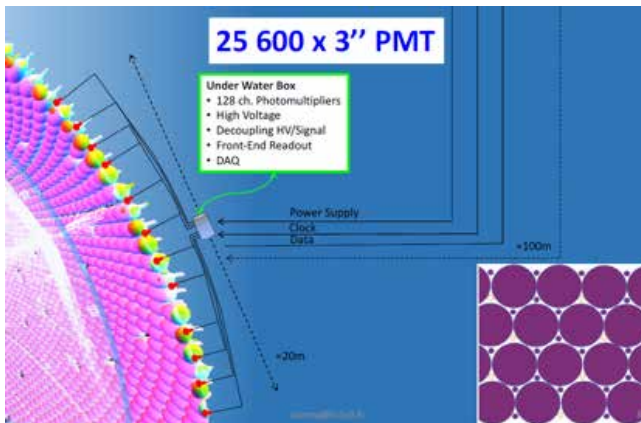


FIGURE 11

Boîte de jonction immergée située à proximité de la sphère JUNO et connectant 128 PM à l'électronique.

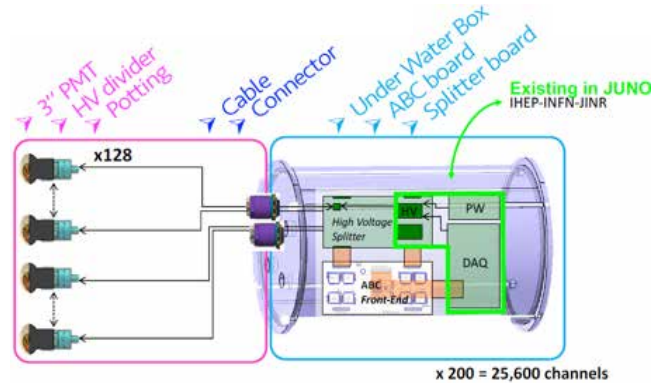


FIGURE 12

Vue détaillée de l'ensemble de l'électronique dans la boîte de jonction avec notamment la carte frontale ABC et la carte permettant de découpler le signal de la haute-tension (HV splitter).

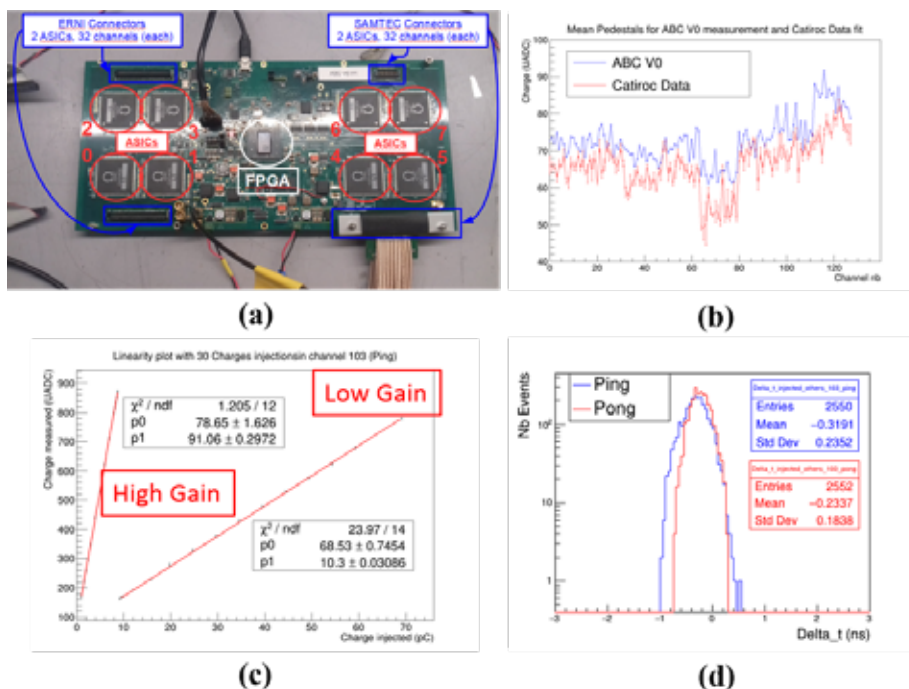


FIGURE 13

(a) Photo de la carte ABC prototype V0. (b) Valeurs des piédestaux pour les 128 voies pour un même ASIC seul ou sur la carte ABC V0. (c) Exemple de linéarité en charge d'une voie pour les modes High Gain et Low Gain sur la carte ABC V0. (d) Spectre de résolution en temps entre 2 ASICS différents démontrant une résolution meilleure que 0,3 ns.

sur le site de JUNO. Ces études ont permis de valider la majeure partie des performances de la carte prototype V0 (**figure 13**) et d'en améliorer certaines de façon à réaliser un prototype V1 capable de respecter le cahier des charges pour les analyses de physique ultérieures.

L'ensemble de ces performances sera ensuite intégré dans la simulation officielle de JUNO afin d'en déduire l'impact sur la physique. Ce travail se fait en étroite collaboration avec l'IHEP à Beijing et NTU à Taiwan et s'inscrit dans le cadre de la thèse de Clément Bordereau (2017-2020), en cotutelle entre le CENBG et NTU.

3 Caractérisation de la radiopureté des matériaux critiques de JUNO

Le groupe a pu mettre à profit pour JUNO son expertise dans la compréhension et la diminution des bruits de fond issus de la radioactivité naturelle acquise dans les expériences NEMO-3 et SuperNEMO. En effet, le bruit de fond accidentel dans JUNO, mimant la détection d'un antineutrino par des coïncidences fortuites, est de même origine. Il provient des impuretés radioactives (chaînes naturelles radioactives ^{238}U et ^{232}Th , ^{40}K et ^{222}Rn) peuvent être présentes à la fois dans le liquide scintillant lui-même mais également dans l'acrylique, les PM 20" et PM 3", la structure en acier ou même dans l'eau pure. Le taux de bruit de fond d'origine accidentelle après coupures ne doit pas dépasser un événement par jour.

Le groupe a contribué à la qualification de matériaux critiques par spectrométrie gamma et par mesures d'émanation Radon (composants des PM 20" et 3", acier inox de la structure de JUNO et roches). En particulier, la taille et la sensibilité uniques du dispositif d'émanation radon du CENBG a pu démontrer que la contribution en radon des 17 500 PM 20" et des 25 600 PM 3" était bien inférieure à la contrainte de radiopureté de $0,2 \text{ Bq/m}^3$ de l'eau dans JUNO (**figure 14**).

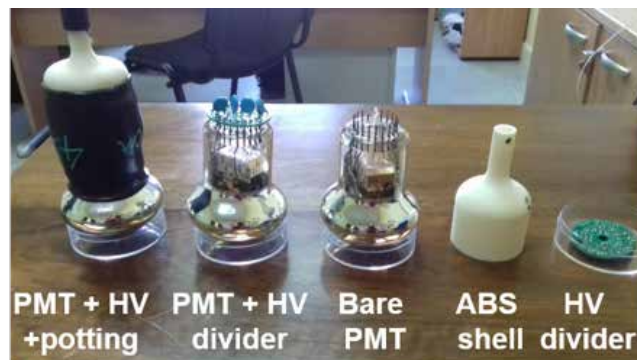
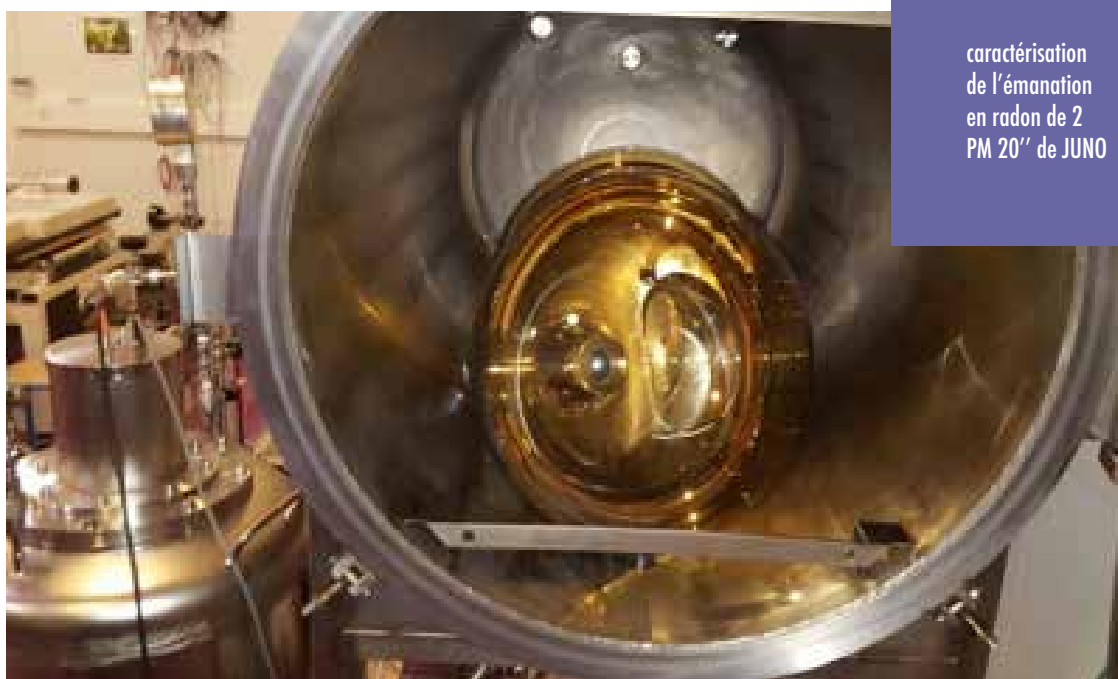


FIGURE 14

Caractérisation par spectrométrie gamma des différents composants des PM 3"

En parallèle de ces mesures, des travaux de simulation développés avec GEANT4 permettant d'évaluer les taux de coïncidences fortuites engendrés par la radiopureté des principaux matériaux utilisés autour du détecteur ont permis de montrer un bon accord en terme de taux de comptage avec la simulation officielle de JUNO. Enfin, des mesures prometteuses ont également été réalisées en 2019 à l'aide d'un laser couplé à un ICPMS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) pour déterminer la contamination en surface et en volume d'un échantillon d'acrylique de JUNO. Ce dispositif unique au monde a été développé par des chercheurs de l'IPREM à Pau et a permis une première cartographie en trois dimensions de la distribution des éléments ^{238}U et ^{232}Th dans l'acrylique avec de surcroît une analyse quantitative de grande sensibilité en-deçà de 10^{-12} g/g .



caractérisation de l'émanation en radon de 2 PM 20" de JUNO

L'expérience Double Chooz (DC) a mesuré l'oscillation des neutrinos auprès des deux réacteurs nucléaires de la centrale de Chooz en France. Double Chooz a pris des données de 2011 à 2018. En 2011 DC a apporté la preuve d'une valeur non nulle de l'angle de mélange θ_{13} avec les données du détecteur lointain placé au maximum de l'oscillation. Dès 2015, Double Chooz a pris des données avec ses 2 détecteurs (proche et lointain) ce qui a permis de réduire fortement l'impact de plusieurs erreurs systématiques. La collaboration a analysé et rapporté une statistique correspondant à 481 jours avec le détecteur lointain et 384 jours avec les deux détecteurs [Kerre¹⁸]. Double Chooz a mesuré l'angle de mélange θ_{13} et la valeur trouvée est $\sin^2 2\theta_{13} = 0,105 \pm 0,014$ (stat.+syst). De plus, DC a mesuré, avec la plus grande précision à ce jour, la section efficace moyenne par fission $\langle \sigma_f \rangle = (5,71 \pm 0,06) \times 10^{-43}$ cm² valeur en accord avec d'autres expériences. La collaboration a aussi observé une distorsion spectrale du spectre des neutrinos des réacteurs par rapport au modèle, cette distorsion est non expliquée à ce jour.

Le principe de détection de DC repose sur un scintillateur liquide dont la lumière de scintillation est détectée par des photomultiplicateurs. Pour pouvoir mener à bien ces mesures, une analyse se basant sur le taux d'événement et sur le spectre en énergie du signal détecté est réalisée. La reconstruction en énergie et la détermination des bruits de fond sont des étapes importantes et elles étaient sous la responsabilité des membres du groupe du CENBG.

La reconstruction de l'énergie implique de nombreuses étapes d'étalonnage et de correction des données : étalonnage en temps et gain des signaux des photomultiplicateurs, correction de la non-uniformité géométrique et de la stabilité dans le temps (scintillateur, photomultiplicateurs, électronique) de la réponse du détecteur, caractérisation de la non-linéarité de la réponse du scintillateur et de l'électronique. La dernière version de cet étalonnage en énergie a été mise en place et propagée dans les données finales de DC en 2018, ainsi que l'estimation des erreurs systématiques associée, et ce, par l'analyse de jeu de données indépendantes de celles utilisées pour la mesure de θ_{13} : déploiement de sources radioactives, captures de neutrons de spallation après passage de muons ou radioactivité ambiante comme les décroissances "Bi-Po".

Ces derniers travaux ont notamment démontré le contrôle de la stabilité de la calorimétrie à un niveau de quelques pour mille sur 7 années comme illustré sur la [figure 15](#).

Trois sources de bruit de fond existent pour ce type d'expérience : le bruit de fond accidentel qui a pour principale origine la radioactivité naturelle et le bruit de fond corrélé qui a pour origine le rayonnement cosmique et qui se divise en 2 composantes : les neutrons rapides et les noyaux cosmogéniques (⁹Li et ⁸He).

Les détecteurs de DC profitent d'une couverture rocheuse permettant de réduire le rayonnement cosmique, néanmoins celui-ci reste non négligeable et il est important de bien réduire ces bruits de fond, d'estimer le taux d'événements restant dans l'échantillon analysé ainsi que leurs spectres en énergie [Kerre¹⁹].

Des analyses dédiées sur les neutrons rapides et les noyaux cosmogéniques (utilisation du veto à muons, corrélations temporelles avec les muons) ont permis d'atteindre un rapport signal sur bruit de 11 dans le détecteur lointain et de 22 dans le détecteur proche. De plus la mesure des spectres de ces bruits de fond ont permis de faire une analyse spectrale pour extraire θ_{13} , le bruit de fond ayant une contribution de 12% sur l'erreur totale.

Une illustration des spectres en énergie enregistrés est donnée [figure 16](#). Sur les spectres des neutrinos des détecteurs proches et lointains sont représentés les contributions des différents bruits de fond : accidentel, neutrons rapides et noyaux cosmogéniques. Les spectres de ces bruits de fond sont ceux mesurés puis ajustés grâce aux études dédiées

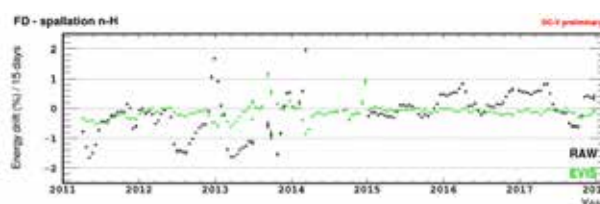


FIGURE 15 Variation relative de l'énergie reconstruite au cours du temps.

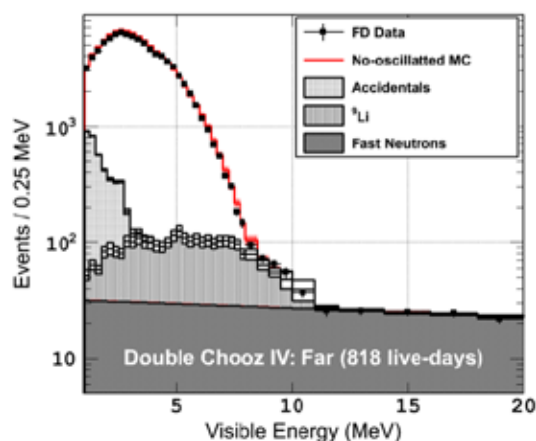
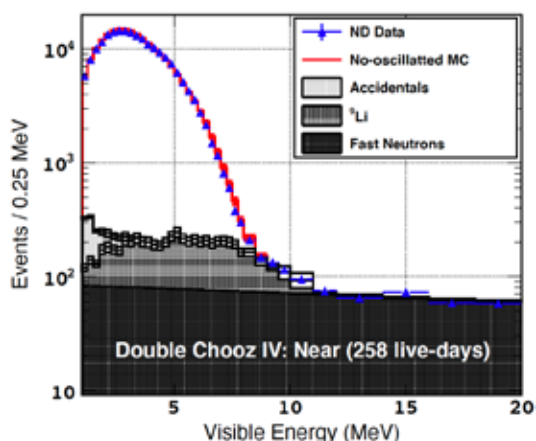


FIGURE 16

Spectres en énergie des données enregistrées avec le détecteur proche (gauche) et lointain (droite) avec les contributions des différents bruits de fond.

R&D DÉCROISSANCE DOUBLE BÊTA SANS ÉMISSION DE NEUTRONS : R2D2

R2D2 (Rare Decays with Radial Detector) est une R&D soutenue par l'IN2P3 depuis 2018. L'objectif est de démontrer qu'une TPC à haute pression remplie de Xenon sous forme gazeuse peut satisfaire les trois critères essentiels pour la recherche de la désintégration double bêta sans émission de neutrino ($\beta\beta 0\nu$) à savoir : une excellente résolution en énergie, un très faible taux de bruit de fond et une grande masse d'isotopes.

Une proto-collaboration impliquant des instituts français a été formée et le programme est conduit par le groupe du CENBG.

Une étude de sensibilité, en supposant un détecteur de 50 kg de ^{136}Xe , a été réalisée via une simulation Monte-Carlo complète [Mere18]. Cette étude a permis de montrer qu'une limite sur la période du processus $\beta\beta 0\nu$ de $2,5 \times 10^{25}$ ans ($\langle m_{\beta\beta} \rangle < (160 - 330) \text{ meV}$) avec une efficacité de 64% et un bruit de fond de 2 événements par an pourrait être atteinte après une année de prise de données (figure 17). Ce résultat est vrai sous certaines hypothèses dont la plus critique est celle liée à la résolution en énergie.

Site de l'expérience Double Chooz avec la position des deux détecteurs par rapport aux deux réacteurs nucléaires : le détecteur lointain à 1 050 mètres et le détecteur proche à 400 mètres.

La première étape du projet est donc de démontrer qu'il est possible d'atteindre une résolution en énergie de 1% FWHM à la valeur du $Q_{\beta\beta}$ (2,458 MeV) du ^{136}Xe . Un prototype a donc été conçu et construit au CENBG, il est actuellement en cours de fonctionnement pour déterminer la résolution en énergie atteignable. En parallèle, une électronique de lecture dédiée doit être développée. Le service électronique du CENBG travaille sur un tel développement dans le cadre du projet OWEN financé par le programme 2019 IdEX Bordeaux.

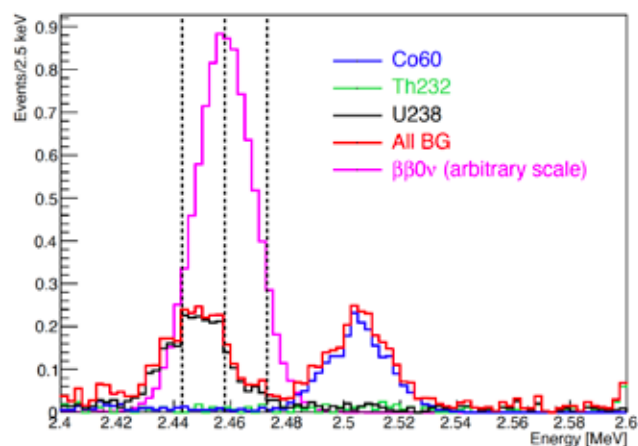


FIGURE 17

Évènements de bruit de fond après des coupes de sélection pour une configuration de 50 kg et 1 année de prise de données. Les lignes verticales délimitent à $\pm 0,6\%$ du $Q_{\beta\beta}$ la région d'intérêt (ROI) $\pm 0,6\%$ of the $Q_{\beta\beta}$



Le groupe du CENBG est impliqué dans la R&D LiquidO qui cherche à développer une nouvelle approche de détection pour la physique du neutrino basée sur l'utilisation de scintillateur opaque ^[BUCK19].

Contrairement aux scintillateurs développés depuis des décennies, la technique LiquidO utilise un scintillateur organique présentant une longueur de diffusion réduite (<1cm) en conservant une longueur d'absorption typique de quelques mètres. La lumière émise par le scintillateur est détectée localement au moyen de fibres optiques lues avec des SiPM. Le maillage des fibres, dont le dimensionnement est adapté aux particules à détecter et aux propriétés du scintillateur, permet de reconstruire le lieu d'interaction des particules caractérisé par une sphère de lumière confinée par l'opacité du scintillateur. L'avantage de cette approche est de permettre une identification des particules et de pouvoir reconstruire la dynamique de l'événement. Ainsi, dans le cas d'électrons de l'ordre du MeV, le dépôt d'énergie est local et le signal reconstruit correspond à une seule sphère de lumière. Pour les rayonnements gamma ou les positrons de même énergie (qui conduisent à la formation de rayonnements gamma de 511 keV), le signal est caractérisé par une topologie à plusieurs sphères dont la chronologie de formation reflète la cinématique de l'interaction. L'utilisation de SiPM avec une électronique adaptée offre une excellente résolution en temps (centaine de ps) qui permet cette reconstruction dynamique de la topologie.

Le groupe mène deux actions dans cette R&D. La première consiste à étudier le potentiel de LiquidO pour la recherche de la décroissance double bêta sans émission de neutrinos $2\beta 0\nu$. L'accès à des masses élevées d'isotopes (multi-tonnes), à un coût raisonnable est aujourd'hui un des défis majeurs à relever

Prototypes
micro-LiquidO (0,25L)
et mini-LiquidO (7,5l)
développés au CENBG

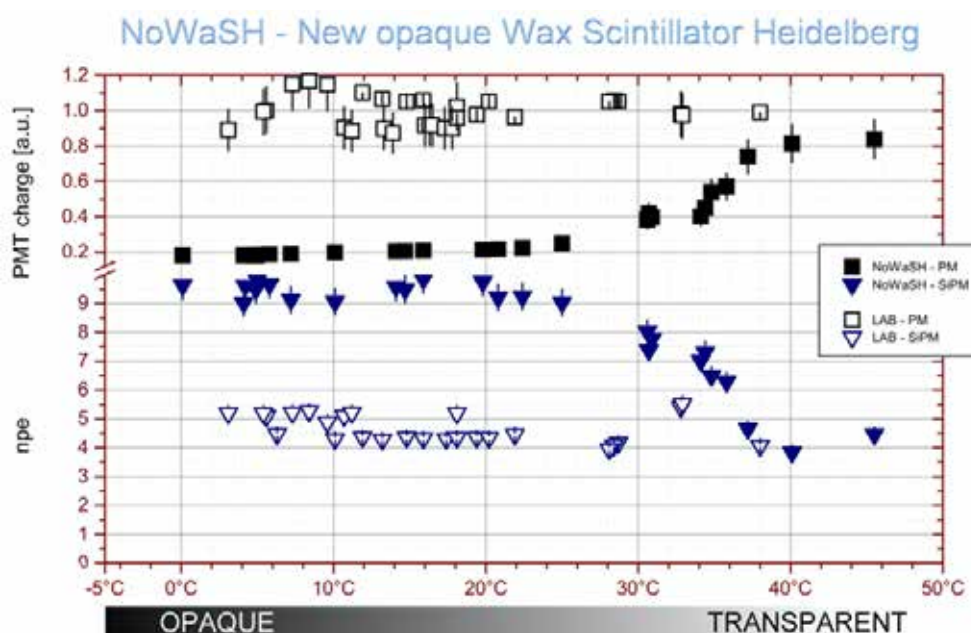


FIGURE 18

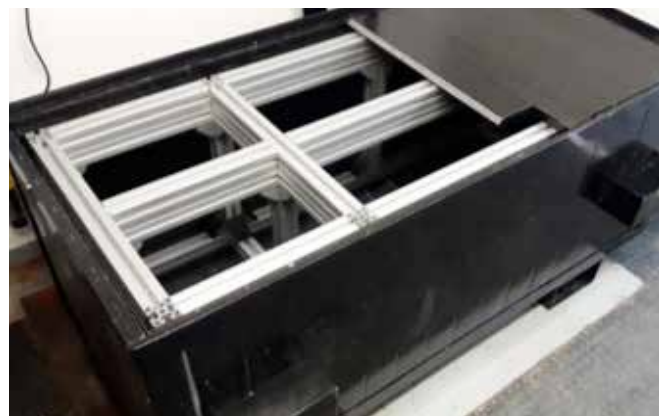
Quantité de lumière observée avec le prototype micro-LiquidO après interaction d'un électron de 1 MeV. Le signal observé par la fibre située à proximité (1 cm) du point d'interaction de l'électron est représenté en bleu, celui mesuré par le photomultiplicateur (PM) situé plus à distance (5 cm) est donné en noir. La quantité de lumière est mesurée en fonction de la température du scintillateur, pour une composition standard transparente de type LAB (points vides) ou de type NoWaSH correspondant au nouveau scintillateur LiquidO (points pleins). Le scintillateur NoWaSH utilisé dans cette mesure présente une opacité qui varie en fonction de la température afin de visualiser l'effet de confinement. Cet effet est visible au travers de la réduction de la quantité de lumière vue par le PM et l'augmentation de la lumière mesurée par la fibre proche du point d'interaction de l'électron.

pour le futur de cette recherche. La possibilité de travailler avec un scintillateur opaque ouvre des perspectives de dopage élevé (>10%) en isotopes double bêta, sans restriction a priori sur le choix de l'isotope. Du point de vue radiopureté, les expériences $2\beta 0\nu$ utilisant actuellement la scintillation (KamLAND-Zen, SNO+) montrent déjà des niveaux de bruit de fond très bas, qui pourraient être encore significativement améliorés par l'identification des particules dans LiquidO. Les premiers calculs montrent qu'avec un niveau de bruit de fond de 10^{-4} coups/(keV.an.kg) (aujourd'hui atteint par KamLAND-Zen ou SNO+), une résolution en énergie (FWHM) de 13% à 1 MeV et un dopage de 10% en tellure naturel, la sensibilité attendue dans un détecteur de la taille de KamLAND-Zen ou SNO+, serait de l'ordre de $4,6 \times 10^{27}$ ans soit 6,0-28,5 meV sur la masse effective du neutrino suivant l'élément de matrice considéré. La R&D en cours doit démontrer si ces niveaux de bruits de fond et de résolution en énergie sont atteignables, voire améliorables.

En parallèle, le CENBG a développé, en collaboration avec d'autres laboratoires de l'IN2P3 ainsi que le CIEMAT (Madrid), le MPIK (Heidelberg) et l'Université de Tohoku (Japon), deux prototypes visant à valider le principe de fonctionnement LiquidO. Deux enceintes de 0,25 et 7,5 l de scintillateurs équipés de fibres et SiPM ont été construites. Le plus petit prototype a permis de démontrer pour la première fois le confinement de la lumière produite par des électrons de 1 MeV avec une quantité de lumière collectée qui est en accord avec les performances optiques attendues. La **figure 18** montre l'effet de confinement observé [CABR19]. Le deuxième prototype sera mis en service en 2020 pour développer les outils de reconstruction et permettre, grâce à sa plus grande dimension, de mettre en évidence la géométrie de la sphère de lumière et de confirmer la résolution en énergie attendue.

(< 10 min) afin de générer des alertes en temps réel et un bas coup. Le choix s'est porté sur un maillage de fibres scintillantes lues par des photodétecteurs de type SiPMs autour duquel s'écoule l'eau nettoyée et purifiée en continu par une centrale de haute performance.

Le CENBG a apporté une contribution technique sur la conception d'un blindage passif à la radioactivité environnante pour réduire les bruits de fond existant en surface. Il s'agit d'un sarcophage en plomb de 5 cm d'épaisseur pour une masse totale de 2,5 tonnes avec sa structure mécanique associée (**Photo ci-contre**). Deux prototypes de détecteurs ont été développés par les universités d'Aveiro et de Valencia, puis installés à l'intérieur de ce sarcophage. Les premières données ont démontré l'efficacité du blindage au bruit de fond et la sensibilité au tritium est actuellement (2019) en cours d'évaluation.



6

TRITIUM

Le projet TRITIUM vise à concevoir un dispositif de surveillance en temps réel de faibles activités de tritium dans l'eau auprès des réacteurs nucléaires, avec une sensibilité jusqu'à 100 Bq/L (comme établie par la réglementation européenne 2013/51/EURATOM). Il est formé par un consortium d'instituts d'Espagne (LARUEX / Universidad de Extremadura, Junta de Extremadura, IFIC Valencia), du Portugal (Universidade de Aveiro, I3N Lisbonne) et France (CENBG) financé par le programme Interreg Sudoe de 2016 à 2019. Le site expérimental se trouve à côté de la centrale d'Almaraz en Espagne, pour un contrôle de l'eau de refroidissement rejeté dans le fleuve Tage qui traverse ensuite le Portugal pour se jeter dans l'Atlantique au niveau de Lisbonne.

Les contraintes d'un tel dispositif sont la grande sensibilité (< 100 Bq/L), une détection directement dans l'eau, une estimation rapide

7

CONTAMINAMÈTRE BÊTA

En 2013, un partenariat est apparu avec l'entreprise Carmelec, qui conçoit, fabrique et commercialise des appareils de radioprotection. Une étude de recherche et développement a été proposée sur la conception d'un appareil capable de détecter une contamination équivalente à 4 Bq/cm² en bêta dans une ambiance gamma d'environ 30 µGy/h fluctuante. Une allocation de thèse CIFRE obtenue auprès de l'ANRT a permis le démarrage de la thèse de Maxime Karst en avril 2013, thèse soutenue en novembre 2016 [Karst16]. Pour assurer un suivi de cette activité de recherche, un financement a été obtenu auprès de la région Aquitaine en 2013. À la suite du succès de ce développement, le partenariat entre le CENBG et l'entreprise Carmelec a été consolidé et pérennisé par la création d'un Laboratoire Commun, soutenu par la réussite au programme LabCom de l'Agence Nationale de la Recherche en 2017 (porteur Cédric Cerna).

[Arno15] R. Arnold et al., Phys. Rev. D 92, 072011 (2015)
 [Arno16] R. Arnold et al., Phys. Rev. D 93, 112008 (2016)
 [Arno16b] R. Arnold et al., Phys. Rev. D 94, 072003 (2016)
 [Arno17] R. Arnold et al., Phys. Rev. D 95, 012007 (2017)
 [Arno17b] R. Arnold et al., Phys. Rev. Lett. 119, 041801 (2017)
 [Arno18] R. Arnold et al., Eur. Phys. Jour. C 78, 10 (2018)
 [Bara17] A. S. Barabash et al., Nucl. Instr. Meth. A 868, 98 (2017)
 [Bara17b] A. S. Barabash et al., JINST 12, P06002 (2017)
 [Buck19] C. Buck et al., arXiv:1908.03334 (2014), submitted to JINST
 [Cabr19] A. Cabrera et al., arXiv:1908/02859 (2019)

[Cern15] C. Cerna, B. Soulé et F. Perrot, AIP, Conf. Proc. 1672, 050002 (2015)
 [Hoda19] R. Hodák et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 46, 115105 (2019)
 [Hube17] A. Huber, Université de Bordeaux [Thèse] (2017)
 [Karst16] M. Karst, Université de Bordeaux [Thèse] (2016)
 [Kerr18] A. Meregaglia et al., JINST 13, 01009 (2018)
 [Kerr19] The Double Chooz Collaboration (H. de Kerret et al.), arXiv:1901.09445 (2019)
 [Mack18] M. Macko, Univ. of Bordeaux and Bratislava Comenius University [Thèse] (2018)

NOYAUX EXOTIQUES



ABSTRACT

means of studies of their decay modes.

Several experiments have been performed at ISOLDE, ALTO and GANIL, for high-precision measurements of the β decay of ^{10}C , ^{22}Mg and ^{30}S (super-allowed Fermi transitions) and of ^{23}Mg , ^{27}Si and ^{37}K (mirror transitions), that represent a test of the "standard model" of weak interaction. On the same topic, the WISArD project started at ISOLDE, aiming at the search of a scalar current of the weak interaction. A test experiment has been carried out as a proof of principle. For structure studies of more exotic nuclei, we performed experiments that took advantage of decay modes involving proton emission. A GANIL experiment has been performed in order to measure the competition between proton and gamma emission that allows to estimate isospin mixing in the states populated by Fermi beta transitions. This experiment addressed the decay of ^{44}Cr , ^{48}Fe and ^{52}Ni . During another experiment at RIKEN, we could observe for the first time three new isotopes at the proton drip-line (^{63}Se , ^{68}Kr and ^{67}Kr). The decay of various nuclei in this mass region has been measured and we have evidenced the decay of ^{67}Kr by 2-proton radioactivity.

In addition, the team is strongly involved in instrumental developments related to our research topics. In the context of the DESIR facility at SPIRAL2, a device based on a double Penning trap is under development (PIPERADE), as well as a high resolution separator (HRS). The work is related to ion traps induced studies of atomic masses that are primary pieces of information about underlying nuclear structure. Mass measurements around the $N = 20$ island of inversion have been performed with ISOLTRAP. A second experiment has been performed at Jyväskylä on nuclei located in the region of deformation around $N=60$. We are also developing a new charged particle tracking device : ACTAR TPC. After a successful R&D phase, a first experiment has been performed at GANIL that allowed a direct observation of the proton radioactivity of isomeric states in ^{53}Co and ^{54}Ni .

RÉSUMÉ

stabilité, en particulier au moyen de l'étude de ses modes de décroissance.

Des expériences ont été menées à ISOLDE, à ALTO et au GANIL pour des mesures de précision des décroissances β de ^{10}C , ^{22}Mg et ^{30}S (transitions de Fermi super-permises) et de ^{23}Mg , ^{27}Si et ^{37}K (transitions miroirs), qui représentent un test de l'interaction faible du "modèle standard". Sur cette même thématique, le projet WISArD, visant la recherche d'un courant scalaire de l'interaction faible, a été démarré à ISOLDE et une expérience test a permis de démontrer la faisabilité de la mesure. Pour l'étude de la structure des noyaux les plus exotiques, nous avons mené des expériences mettant à profit l'émission de proton(s) dans la décroissance. Une expérience au GANIL a été réalisée pour mesurer la compétition entre les émissions de protons ou de rayonnement gamma qui permet d'estimer le mélange d'isospin de l'état peuplé par transition β de type Fermi. Cette expérience portait sur les noyaux ^{44}Cr , ^{48}Fe et ^{52}Ni . Lors d'une autre expérience au RIKEN, nous avons pu mettre en évidence l'existence de nouveaux isotopes à la drip-line proton (^{63}Se , ^{68}Kr et ^{67}Kr). La décroissance de différents noyaux de cette région de masse a pu être mesurée, et nous avons pu observer la radioactivité 2-protons de ^{67}Kr .

L'équipe est de plus largement impliquée dans un programme de développements instrumentaux en lien avec ses activités scientifiques. Dans le cadre de l'installation DESIR auprès de SPIRAL2, un dispositif utilisant un double piège de Penning est en cours de développement (PIPERADE), ainsi qu'un séparateur à haute résolution (HRS). Ce travail autour du piégeage des ions permet des études sur les masses atomiques qui représentent une information primordiale sur la structure des noyaux. Des mesures de masse autour de l'îlot d'inversion à $N \sim 20$ ont pu être réalisées à l'aide du dispositif ISOLTRAP et une seconde expérience a été réalisée à Jyväskylä portant sur l'étude de noyaux dans la région de déformation autour de $N=60$. Un autre développement porte sur la réalisation d'un nouveau dispositif

In the 2014-2019 period, the group has conducted a research program on different topics concerning atomic nuclei far from stability, especially by

PERMANENTS

Pauline ASCHER
Bertram BLANK
Mathias GERBAUX
Jérôme GIOVINAZZO
Stéphane GRÉVY
Teresa KURTUKIAN NIETO
Maud VERSTEEGEN

POST-DOCTORANTS

Audric HUSSON
Julien MICHAUD
Marcin POMORSKI
Antoine DE ROUBIN

DOCTORANTS

Cécile MAGRON
Antoine DE ROUBIN
Mehdi AOUADI
Thomas GOIGOUX
Marjut HUKKANEN

COLLABORATIONS

INTERACTION FAIBLE : U. of Jyväskylä, GANIL, CERN,
U. of Guelph, TRIUMF Vancouver, LPC Caen

PIPERADE : MPIK Heidelberg, CSNSM Orsay, GANIL,
LPC Caen

ACTAR TPC : GANIL, U. of Leuven, U. of Santiago de
Compostella

C., RIKEN, LNL Legnaro, U. Regina

WISArD : K.U. Leuven, LPC Caen, NPI Rez, ISOLDE/CERN

GAMOW-TELLER : IFIC Valencia, University of Osaka, GANIL

DEUX PROTONS : GANIL, RIKEN, IFIC Valencia, Bucarest

DESIR : collaboration internationale auprès du GANIL

GET : GANIL, CEA Saclay, MSU/NSCL

HRS : GANIL

pour la trajectographie de particules chargées : ACTAR TPC. Après une phase de R&D importante, une première expérience a été menée au GANIL, permettant l'observation directe de la radioactivité proton des états isomériques de ^{53}Co et ^{54}Ni .

INTRODUCTION

Le groupe "Noyaux Exotiques" mène des études expérimentales sur les noyaux atomiques très éloignés de la stabilité. Ces travaux s'appuient sur la caractérisation des décroissances radioactives de ces noyaux, ce qui permet de contraindre les modèles physiques décrivant le noyau, de préciser les limites de la table des isotopes et les masses atomiques. Ces études revêtent aussi une importance en astrophysique dans la compréhension, notamment, des processus rp et r de la nucléosynthèse stellaire.

Le groupe travaille en particulier sur les décroissances exotiques des noyaux très riches en protons. L'étude de la radioactivité "2-protons", mise en évidence expérimentalement en 2002 par l'équipe, est un axe central de nos activités, avec récemment l'observation de ce mode de décroissance pour ^{67}Kr . Néanmoins, divers travaux sont menés en marge de cette thématique, tels que l'émission multi-protons après décroissance β ou l'étude de la brisure de symétrie d'isospin.

Dans le contexte de l'étude des corrélations dans la radioactivité 2-protons, le groupe est impliqué dans le développement et l'exploitation d'un détecteur de nouvelle génération pour la reconstruction de trajectoires de particules chargées en physique nucléaire : ACTAR TPC.

L'équipe est également fortement impliquée dans l'étude de l'interaction faible au moyen des transitions β super-permises ou miroir. Initialement, il s'agissait essentiellement de mesures de grande précision des durées de vie et des rapports d'embranchement des transitions considérées. Nous avons également démarré le projet WISARD qui vise la recherche de courants exotiques de l'interaction faible qui ne sont pas pris en compte dans le "Modèle Standard".

Le groupe mène ses expériences à la fois sur des installations de type "fragmentation du projectile" (GANIL/LISE3, RIKEN/BigRIPS...) et des installations dites de "basse énergie" (CERN/ISOLDE, Jyväskylä/IGISOL...). Concernant ces dernières, nous sommes très fortement engagés dans le projet SPIRAL2, avec la coordination scientifique de l'installation de basse énergie DESIR ainsi que le développement d'équipements spécifiques pour cette installation : le séparateur haute résolution HRS et le double piège de Penning PIPERADE (avec le GPIB pour refroidir et mettre en paquets les ions) pour le stockage et la purification de noyaux radioactifs.



DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ 2-PROTONS DE ^{67}Kr LORS D'UNE EXPÉRIENCE AU RIKEN.

VALIDATION DE PRINCIPE DE L'EXPÉRIENCE WISARD À ISOLDE : MESURE DE LA DÉCROISSANCE DE ^{32}Ar .

COMPLÉTION DE L'ENSEMBLE GPIB+PIPERADE EN VUE DU DÉMARRAGE DES TESTS DU DISPOSITIF.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE ACTAR TPC DE DÉCROISSANCE, AVEC L'OBSERVATION DE L'ÉMISSION DES PROTONS DES ÉTATS ISOMÉRIQUES DE ^{53}Co ET ^{54}Ni .

1

L'INTERACTION FAIBLE ÉTUDIÉE AVEC DES TRANSITIONS β DE TYPE FERMI

L'interaction faible peut être étudiée par des mesures à très haute énergie, par exemple au LHC, de production de nouvelles particules ou par des mesures de précision de désintégrations β . Dans cette deuxième catégorie, ce sont surtout les transitions super-permises de type Fermi qui permettent de sonder certaines caractéristiques de l'interaction. En mesurant avec précision la force de transition f et moyennant la prise en compte de quelques corrections théoriques, la constante de couplage G_V et l'élément V_{ud} de la matrice CKM de mélange des quarks peuvent notamment être déterminés. Pour des transitions β de type $0^+ \rightarrow 0^+$, la différence de masse entre le noyau étudié et son noyau fils après désintégration β , sa durée de vie et le rapport d'embranchement pour la transition super-permise doivent être mesurés pour arriver à la valeur f pour un noyau donné (figure 1). Pour des décroissances de noyaux "miroir" le mélange entre transition de type "Fermi" et de type "Gamow-Teller" doit également être déterminé.

1 - Transition $0^+ \rightarrow 0^+$

Nous avons étudié récemment trois noyaux pour déterminer avec précision leur durée de vie et les rapports d'embranchement : ^{10}C , ^{22}Mg et ^{30}S . Les deux premiers de ces noyaux ont été produits et étudiés à ISOLDE/CERN, le troisième au GANIL sur le séparateur LISE3.

La décroissance de ^{10}C

Le noyau ^{10}C est produit à ISOLDE par l'impact d'un faisceau de protons sur une cible CaO [AQUA17]. Les fragments produits sont extraits de la cible, ionisés, séparés en masse et envoyés à l'expérience. Comme il n'y a pas de décroissance vers l'état fondamental, une mesure relative des taux de rayonnement γ de l'énergie de 1021,6 keV par rapport à celui à 718,4 keV permet de déterminer le rapport d'embranchement super-permis $0^+ \rightarrow 0^+$ recherché (figure 1).

Cependant, l'énergie de la première raie γ est très proche et non distinguable par rapport à un événement d'empilement de deux photons de 511 keV provenant de l'annihilation d'un positron. Pour extraire le nombre de photons de 1021,6 keV réellement observés, il faut soustraire le taux d'empilement (figure 2). Ce taux peut être déterminé en mesurant son analogue pour un noyau ayant des caractéristiques de décroissance similaires à ^{10}C mais sans le rayonnement γ à 1022 keV. Pour cette procédure de soustraction nous avons choisi le noyau ^{19}Ne qui a une durée de vie et une énergie de décroissance similaires à ^{10}C .

L'analyse est actuellement encore en cours pour déterminer avec précision la contribution de l'empilement sous le pic de 1021,6 keV à l'aide de simulations de type "Monte Carlo" qui utilisent le spectre en énergie du rayonnement γ et la structure en temps des événements.

La décroissance de ^{22}Mg

Le ^{22}Mg a été produit à partir d'une cible de SiC avec une source de type LIST (Laser Ion Source Trap). Cette source a une barrière de potentiel qui repousse les noyaux ionisés par ionisation de surface autour de la cible. Seuls les atomes neutres peuvent quitter l'enceinte de la cible. Ensuite, les atomes sont sélectivement ionisés par un faisceau laser adapté en fréquence à l'élément à ioniser. Ce principe permet de refouler efficacement les noyaux de ^{22}Na copieusement produits par ionisation de surface et a permis que ce contaminant soit supprimé pendant notre expérience. En revanche, cela induit en contrepartie une

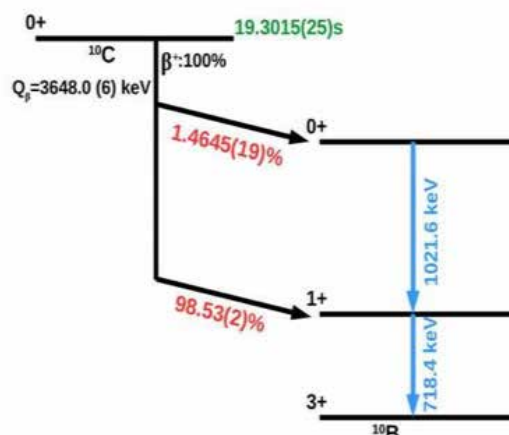


FIGURE 1

Schéma de décroissance de ^{10}C avec sa durée de vie, la chaleur de décroissance Q_β et les rapports d'embranchement.

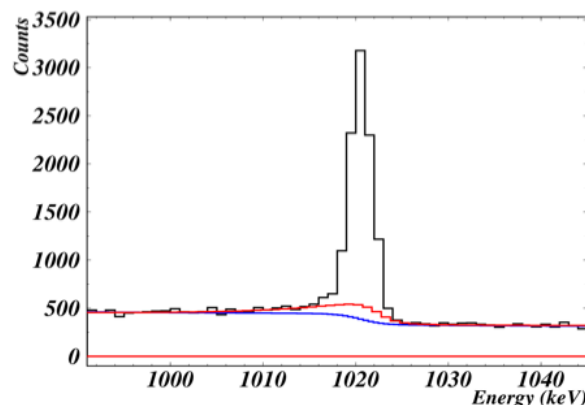


FIGURE 2

Spectre expérimental de rayonnement γ dans la région autour d'une énergie de 1022 keV. La courbe noire montre le spectre expérimental, la courbe rouge la contribution due à l'empilement de deux photons de 511 keV et la courbe en bleu le fond de rayonnement γ .

perte d'un facteur de l'ordre de 50 pour une perte d'un facteur de l'ordre de 50 à observer pour ^{22}Mg .

Le but de cette expérience était de mesurer avec précision (de l'ordre de 0,1%) la durée de vie de ^{22}Mg et les rapports d'embranchement vers les états du noyau fils (de l'ordre de 0,3-0,4%). 19 runs pour la mesure de la durée de vie ont été enregistrés avec des cycles basés sur un temps d'accumulation de 6 s et un temps de décroissance de 40 s, tandis que 44 runs ont été faits pour la mesure des rapports d'embranchement avec des temps de 6 s et 12 s pour les cycles de mesure.

Le dispositif expérimental consistait en un dérouleur de bande pour transporter l'activité, un scintillateur plastique pour détecter les particules β^+ et un détecteur germanium très précisément étalonné en efficacité pour la mesure de l'énergie des raies γ . Après accumulation de l'activité sur la bande, celle-ci est déplacée de près de 10 cm pour positionner l'activité entre le scintillateur plastique et le détecteur germanium. A la fin d'un cycle de mesure (52 s et 25.5 s pour les cycles de la mesure de la durée de vie et des rapports d'embranchement respectivement), la bande est déplacée encore une fois pour évacuer l'activité résiduelle hors de vue des détecteurs.

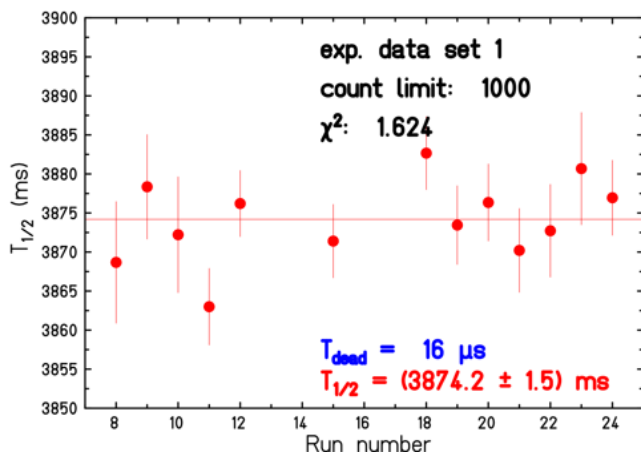


FIGURE 3

Résultat préliminaire pour la durée de vie de ^{22}Mg en fonction du numéro de runs. La valeur moyenne donnée dans la figure ne tient compte que des erreurs statistiques.

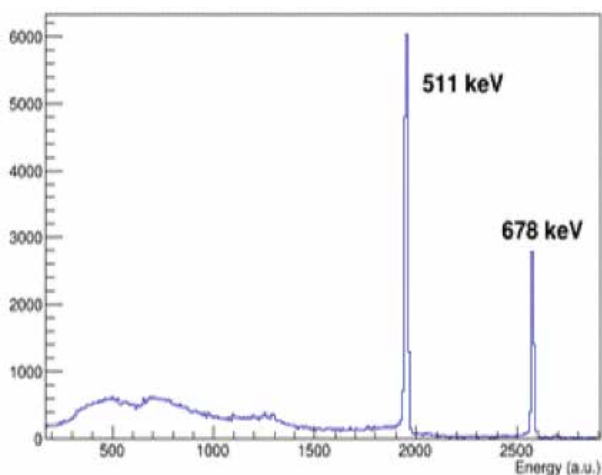


FIGURE 4

Spectre du rayonnement γ de la décroissance de ^{30}S . La raie γ d'intérêt est celle à 678 keV.

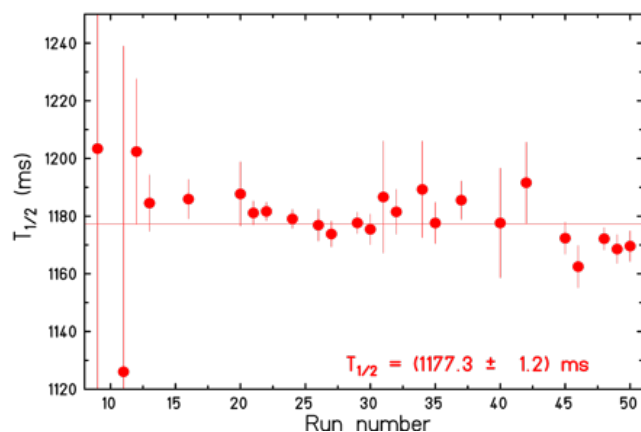


FIGURE 5

Durée de vie de ^{30}S en fonction du numéro de run. La moyenne donne 1177.3(12) ms, en accord avec la valeur de la littérature.

L'analyse est actuellement en cours et un résultat préliminaire pour la durée de vie a été obtenu (figure 3) qui démontre qu'une précision statistique de 0,04% a été obtenue.

La décroissance de ^{30}S

Contrairement aux deux expériences précédentes, la mesure de la durée de vie et des rapports d'embranchement de ^{30}S a été effectuée au GANIL sur le séparateur LISE3. Les noyaux d'intérêt ont été produits par fragmentation d'un faisceau primaire de ^{32}S à 50 MeV/A sur une cible de béryllium. Les fragments de ^{30}S ont été sélectionnés avec LISE3 et implantés dans une bande de transport qui amenait l'activité entre un scintillateur plastique pour la détection des particules β^+ et un détecteur germanium précisément étalonné pour la détection du rayonnement γ .

La figure 4 montre un spectre γ de la décroissance de ce noyau avec la raie à 678 keV clairement visible. La figure 5 donne un résultat préliminaire de la durée de vie du noyau ^{30}S .

Comme dans le cas de ^{22}Mg , la qualité statistique des données est telle que nous devrions atteindre la limite de 0,1% de précision pour la durée de vie et de l'ordre de 0,3% pour les rapports d'embranchement. Cependant l'analyse est encore en cours.

2 - Les transitions β "miroir"

Les transitions "miroir" sont des transitions β entre deux noyaux qui échangent leurs nombres de protons et de neutrons lors de la désintégration β . Ces transitions permettent également de déduire l'élément V_{ud} de la matrice de mélange de quarks, mais en plus de la durée de vie, du rapport d'embranchement et de la chaleur de réaction, il est nécessaire de mesurer le paramètre de mélange entre transition de type Fermi et Gamow-Teller, seule la partie Fermi intervenant dans le calcul de V_{ud} . Dans deux expériences nous avons mesuré récemment les durées de vie et les rapports d'embranchement de ^{23}Mg , ^{27}Si et ^{37}K .

Les décroissances de ^{23}Mg et ^{27}Si

Les décroissances de ^{23}Mg et ^{27}Si ont été étudiées sur l'installation IGISOL à l'Université de Jyväskylä [MAGR17]. Ces deux noyaux ont déjà fait l'objet d'études dans le passé, mais une amélioration significative a pu néanmoins être apportée. Les deux noyaux ont été produits par des réactions (p,n) sur des cibles de ^{23}Na et ^{27}Al . En réglant le spectromètre de masse d'IGISOL sur les masses $A=23$ et 27 respectivement, un faisceau pur de ^{23}Mg (contaminé uniquement par le noyau stable ^{23}Na) et de ^{27}Si (uniquement avec le noyau ^{27}Al) a pu être livré à l'expérience.

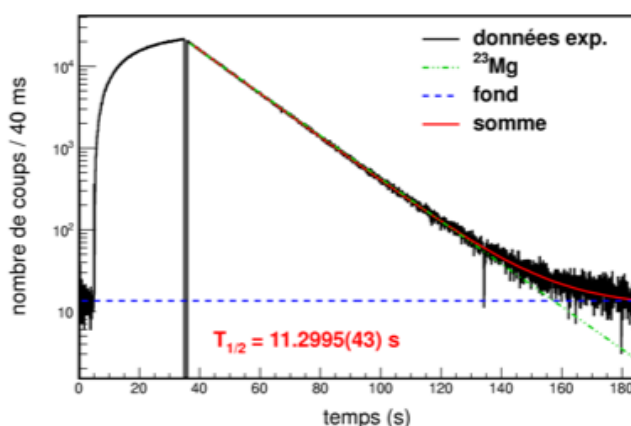


FIGURE 6

Distribution en temps des événements pour un run de ^{23}Mg . Les données expérimentales sont ajustées avec une contribution de ^{23}Mg et un fond constant.

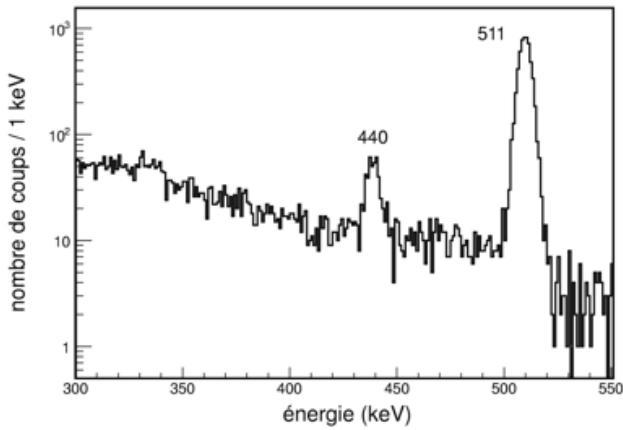


FIGURE 7 Spectre en énergie de rayonnement γ de la décroissance de ^{23}Mg .

Les résultats pour ^{23}Mg sont montrés dans les figures 6 et 7. La figure 6 montre la distribution en temps des événements pour un run. Un cycle commence avec une mesure de fond, suivi de l'accumulation de l'activité durant 30s puis de 150s de mesure de décroissance. La figure montre aussi les différentes contributions à l'ajustement des données expérimentales. L'ensemble des runs donne une valeur finale pour la durée de vie de ^{23}Mg de 11,303(3) s.

La figure 7 montre le spectre en énergie γ de la décroissance de ce noyau. La raie à 440 keV représente la décroissance du premier état excité du noyau fils ^{23}Na vers son état fondamental avec un rapport d'embranchement de 7,805(81)%. Cette mesure a permis de déterminer la probabilité d'alimentation de l'état fondamental de ^{23}Na de 92,08(14)% (moyenne de notre nouvelle mesure et de celles de la littérature).

Des valeurs similaires ont été obtenues pour la décroissance de ^{27}Si . Une durée de vie de 4,117(20) s a été déterminée et le rapport d'embranchement vers le premier état excité est de 0,164(28)% donnant un rapport d'embranchement vers l'état fondamental de 99,74(2) %.

La décroissance ^{37}K

Le noyau ^{37}K a été produit par des réactions de spallation d'un faisceau de proton sur une cible de CaO à ISOLDE. La durée de vie et les rapports d'embranchement de ^{37}K ont été déterminés en implantant l'activité sur une bande de transport qui l'amène au point de collection au point de mesure situé entre un scintillateur plastique et un détecteur germanium précisément étalonné.

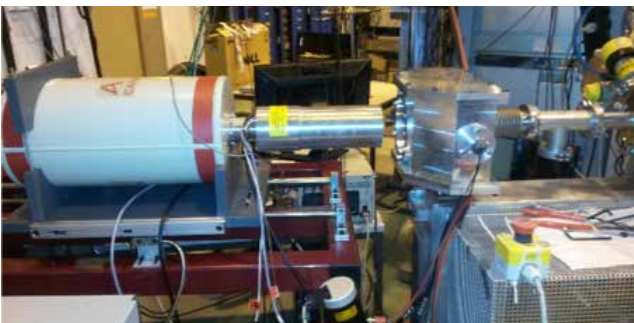
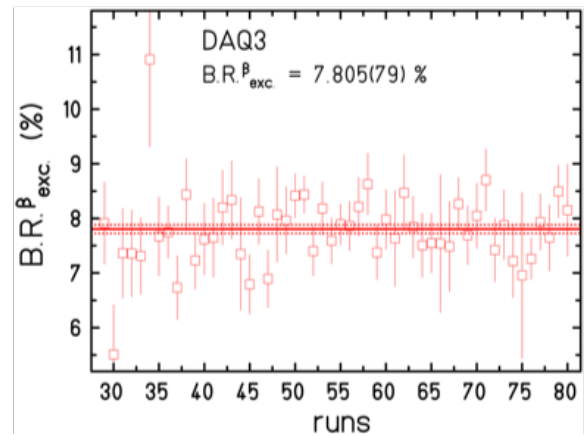


FIGURE 8 Dispositif expérimental pour la mesure de la durée de vie et des rapports d'embranchement de la décroissance de ^{37}K . Le détecteur Germanium et la chambre de mesure sont visible au fond, tandis que le haut du dérouleur de bande se trouve sur l'avant de la figure à droite.



Le rapport d'embranchement pour l'alimentation du premier état excité de ^{23}Na .

La figure 8 montre une photo du dispositif expérimental dans le hall d'ISOLDE au CERN. Le détecteur germanium et la chambre de mesure sont visibles ainsi que, en avant-plan à droite, le haut du dérouleur de bande.

Malgré un fort taux d'empilement d'événements pendant la mesure des résultats en accord avec des valeurs de la littérature ont pu être obtenus. La durée de vie est selon notre mesure de 1236,35(88) ms. Le rapport d'embranchement vers le premier état excité de ^{37}Ar est 2,20(17)% ce qui donne un rapport d'embranchement pour l'alimentation de l'état fondamental de 97,96(14)%. La précision de ces valeurs est fortement limitée par les problèmes d'empilement et pourrait être améliorée de manière significative dans une future expérience.

La figure 9 résume les résultats de cette expérience en montrant la précision sur la durée de vie sur le rapport d'embranchement avant nos mesures et après celles-ci en incluant un résultat concernant la durée de vie publiée pendant notre analyse de données et une nouvelle mesure du paramètre de mélange Fermi/Gamow-Teller.

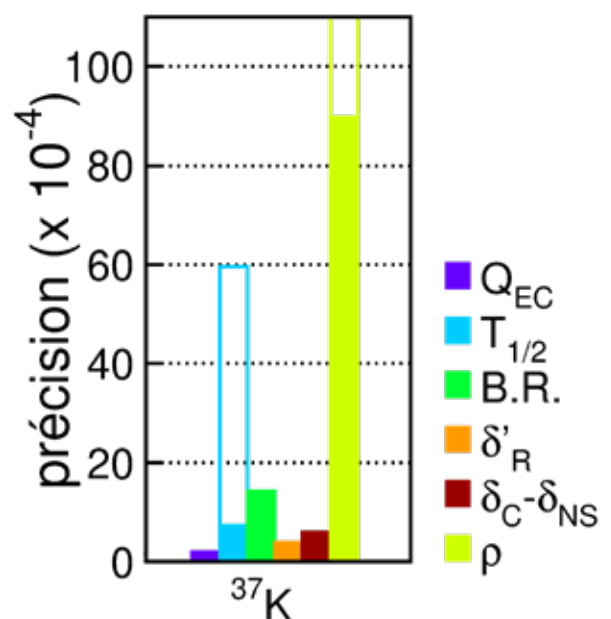


FIGURE 9

Les grandeurs nécessaires pour déterminer la valeur F_t pour le cas de ^{37}K . Pour la durée de vie et le paramètre de mélange Fermi/Gamow-Teller on voit l'amélioration de ces dernières années notamment avec nos mesures. Les barres vides représentent les anciennes précisions.

Motivations

L'interaction faible gouverne la décroissance β , les désintégrations de nombreux leptons, comme le μ^- ou le π^- par exemple, et de hadrons, comme les K ou le Λ . Elle est décrite dans le cadre du Modèle Standard (MS) par la théorie "V-A". Dans ce cadre, les éléments de matrice utilisés pour calculer les taux de désintégration / désintégration ne font intervenir que des courants hadroniques et leptoniques de type "vecteur" et "axial-vecteur" [JACK57]. Cette restriction, par rapport aux cinq types possibles de courants qui vérifient l'invariance de Lorentz, est dictée par l'observation expérimentale de la violation de parité maximale dans l'interaction faible [WUS7], qui se traduit notamment par l'observation exclusive de neutrinos d'hélicité gauche et d'anti-neutrinos d'hélicité droite [GOLD58]. Les constantes de couplage associées aux trois courants restants, de types scalaire, tenseur et pseudo-scalaire, sont donc supposées nulles bien que rien ne l'oblige d'un point de vue théorique. La recherche de contributions à l'interaction faible au-delà du MS consiste alors à chercher les effets de ces courants dits "exotiques", soit à très haute énergie, par la recherche de nouvelles particules, ou à basse énergie, dans la décroissance β . C'est à cette deuxième catégorie qu'appartient l'expérience WISArD : Weak Interaction Studies with ^{32}Ar Decay.

Dans les décroissances β , la corrélation angulaire entre la particule beta et le neutrino dépend des constantes de couplage associées aux courants de l'interaction faible, à travers un facteur appelé $a_{\beta\nu}$, obtenu par la mesure de la corrélation angulaire entre le beta et le neutrino. Pour une décroissance de type Fermi pure ($S=0$, $\Delta I=0$), la valeur de $a_{\beta\nu}$ prédite par le MS est de 1. Toute déviation signe la présence de courant scalaire dans l'interaction faible. De la même manière, pour une décroissance de type Gamow-Teller pure ($S=1$, $\Delta I=0, \pm 1$), $a_{\beta\nu}$ est prédit égal à $-1/3$, et toute déviation permet de signer la présence d'un courant de type tenseur.

La mesure directe de la corrélation angulaire entre la particule beta et le neutrino est très difficile, du fait de la nécessité de détecter le neutrino. On peut néanmoins mesurer le recul du noyau associé à l'émission des deux leptons. Dans le cas d'une décroissance de Fermi pure, le positron et le neutrino sont émis préférentiellement dans la même direction ($a_{\beta\nu} > 0$), et le recul du noyau est maximal. C'est l'inverse pour une décroissance de Gamow-Teller pure. Le recul du noyau fils n'excède cependant pas quelques keV dans le cas des noyaux les plus légers (^6He), et sa mesure reste un défi. Elle est possible dans des dispositifs spécifiques de type piège (piège magnéto-optique, piège de Paul...), ou par l'effet cinématique que le recul induit sur la distribution en énergie de particules émises en vol par le noyau fils. C'est par cette dernière méthode qu'une des mesures les plus précises de $a_{\beta\nu}$ a été obtenue [ADEL99], dans la décroissance de ^{32}Ar . Ce noyau décroît sur l'état isobarique analogue (IAS) de ^{32}Cl , émetteur proton, par une transition de type Fermi pure. La déformation du pic proton liée à son émission en vol a été mesurée et ajustée, ce qui a permis d'estimer $a_{\beta\nu}$ avec une précision de 0.65%. Afin de rester compétitif avec les prochaines recherches directes d'un nouveau boson vecteur à très haute énergie au LHC [GONZ19], l'expérience WISArD propose une nouvelle mesure de $a_{\beta\nu}$, également basée sur la décroissance de ^{32}Ar , avec pour objectif d'atteindre une précision de l'ordre du %. Pour atteindre cet objectif, il ne s'agit plus de mesurer une déformation du pic proton, mais de détecter en coïncidence les protons et les particules beta, et de déterminer le décalage entre les spectres des protons émis dans la même direction et dans celle opposée au positron.

Dispositif

La figure 10 illustre le principe de la mesure. Le faisceau d' ^{32}Ar est arrêté au centre du dispositif, sur une mince feuille de mylar. Deux plans de détecteurs sont disposés de façon symétrique de part et d'autre de la feuille. Chaque plan contient quatre détecteurs silicium pour les protons, et le plan supérieur, contient un détecteur beta en son centre. Celui-ci est constitué d'un scintillateur plastique et d'un photodétecteur. L'ensemble est placé dans un champ magnétique intense, afin de focaliser vers ce détecteur tous les positons émis.

L'expérience WISArD est installée dans le hall expérimental de l'installation de production d'ions radioactifs ISOLDE au CERN. Elle utilise l'aimant supraconducteur de l'expérience antérieure WITCH, aujourd'hui démontée [FINL16]. Une première mesure effectuée en novembre 2018 a permis de prouver la faisabilité de l'expérience [ARAU19]. La figure 11 montre le dispositif expérimental mis en œuvre, utilisant les détecteurs disponibles dans la collaboration. Les 8 détecteurs protons, disposés de part et d'autre de la feuille de mylar sont des détecteurs silicium de 300 μm d'épaisseur et de 3 cm de diamètre. Le détecteur beta est constitué d'un scintillateur plastique de 2 cm de diamètre, couplé à un SiPM. Les ions d' ^{32}Ar sont délivrés par ISOLDE à 30 keV. Les positons émis dans l'hémisphère supérieur sont détectés avec une efficacité proche de 100% grâce au champ magnétique de 4 T dans lequel l'ensemble de la tour est placé. L'efficacité de détection des protons est principalement due à l'angle solide couvert par les détecteurs et est de l'ordre de 8%.

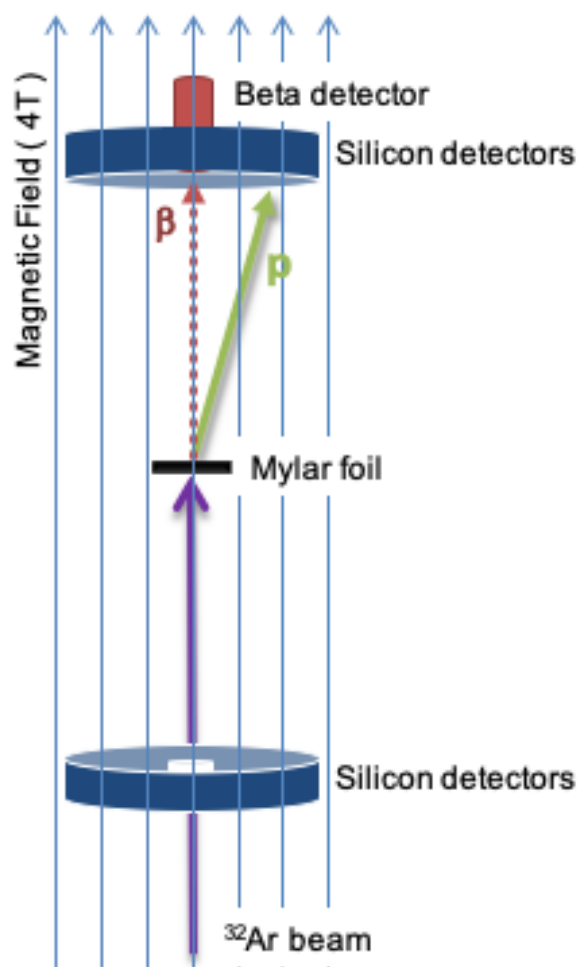


FIGURE 10

Principe de la mesure dans WISArD



FIGURE 11 Dispositif expérimental pour l'expérience test de Novembre 2018

Premiers résultats

La prise de données de novembre 2018 correspond à environ 36 h de faisceau d' ^{32}Ar . La **figure 12** montre une partie du spectre en énergie mesuré des protons, centrée sur le pic à 3356 keV, correspondant aux protons émis par l'IAS dans le noyau fils ^{32}Cl , peuplé par la transition de Fermi pure. Le pic obtenu pour les protons détectés dans le plan supérieur de détection, en coïncidence avec une particule beta également détectée dans le plan supérieur, est décalé vers les basses énergies (courbe rouge) par rapport au pic total (courbe noire). En effet, ils sont émis par le noyau de ^{32}Cl s'éloignant du plan de détection. De la même manière, un décalage vers les plus hautes énergies dans le cas des protons détectés dans le plan inférieur en coïncidence avec une particule beta peut être observé. Le décalage est déterminé à partir du barycentre des pics et permet d'extraire la valeur de $a_{\beta\nu}$, moyennant une simulation Monte Carlo précise du dispositif, mettant en œuvre un générateur d'événements physiques (CRADLE++) et le tracking des particules (GEANT4). Le principe de l'analyse consiste en effet à reproduire les données en utilisant plusieurs valeurs de $a_{\beta\nu}$.

Le résultat de cette première expérience test est en accord avec les prédictions du MS, à la fois pour la transition de Fermi pure, et pour une transition de Gamow-Teller pure également accessible.

La mesure pour la transition de Fermi est déjà parmi les trois plus précises à ce jour. L'incertitude est dominée par la statistique, et l'étude détaillée des sources d'incertitudes systématiques montre qu'un gain de plus d'un ordre de grandeur en sensibilité est possible. Combiné à deux semaines de faisceau d' ^{32}Ar , avec lesquelles une erreur statistique bien inférieure à 10^{-3} pourra être atteinte, l'objectif d'une mesure au % de $a_{\beta\nu}$ est possible.

Perspectives

Durant la longue période d'arrêt du CERN (2019-2021), l'instrumentation de WISArD sera complètement renouvelée et optimisée. Des efforts sont entrepris sur la ligne de faisceau, afin d'en augmenter la transmission. Les détecteurs protons font l'objet d'un nouveau design dédié, afin d'optimiser l'angle solide de détection et d'améliorer leur résolution en énergie (5-10 keV FWHM). La principale source d'incertitude systématique identifiée provient de la rétrodiffusion des électrons, à la fois dans la feuille d'implantation et à la surface du scintillateur du détecteur beta. Des mesures de rétrodiffusion sont en cours afin de mieux contraindre et de valider les simulations GEANT4 indispensables à l'analyse des données, et le seuil de détection des particules beta abaissé autant que possible (~ 10 keV).

Le nouveau système de détection devra être installé dans le dispositif WISArD en 2021. Il permettra des mesures de $a_{\beta\nu}$ au % à la fois pour la transition de Fermi pure de l' ^{32}Ar , mais également pour des transitions de Gamow-Teller, dans une même expérience.

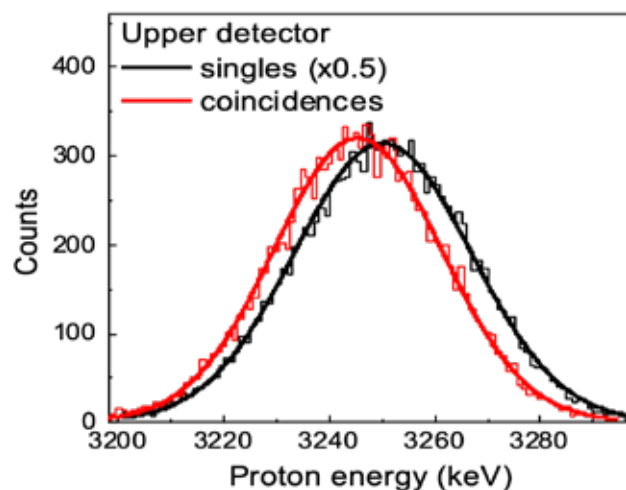


FIGURE 12

Zoom sur une partie du spectre des protons émis par le ^{32}Cl , correspondant à la décroissance de l'IAS. Les protons émis en vol et détectés en coïncidence avec les particules beta subissent un décalage cinématique.

La mesure des observables de décroissance des noyaux déficients en neutrons permet de tester et contraindre les modèles nucléaires théoriques, par exemple les termes de l'interaction nucléaire qui brisent la symétrie d'isospin. C'est le cas pour les décroissances par émission retardée de protons des noyaux ^{44}Cr , ^{48}Fe et ^{52}Ni ($T_z = -2$) : comme on peut le voir sur la **figure 13**, l'émission d'un proton depuis l'IAS (Isobaric Analog State) est interdite ($\Delta T = 3/2$). Si la symétrie d'isospin était exacte, l'IAS ne devrait décroître que par émission γ . A contrario, si un proton est émis depuis l'IAS alors il y a mélange d'isospin de l'IAS.

Un travail théorique récent de N. Smirnova et al. [SMIR17] a montré que la détermination expérimentale du rapport entre les branches proton et gamma de l'IAS peuplé par décroissance β peut être utilisé pour extraire l'impureté d'isospin de ces états et ainsi contraindre directement les modèles. Les cas de ^{44}Cr et ^{48}Fe ont été traités dans la Ref. [SMIR17] mais les rapports I_p/I_γ pris en compte ne proviennent pas de mesures expérimentales. Une expérience a été réalisée au GANIL afin de déterminer ces observables expérimentales et ainsi extraire de manière plus précise et fiable les impuretés d'isospin de ces états.

Le cas de ^{52}Ni n'a pas été traité dans la Ref. [SMIR17], étant un cas particulier. Il a en effet été suggéré récemment, suite à des mesures de masse de $^{52,52m}\text{Co}$, que le proton de haute intensité supposé longtemps venir de l'IAS viendrait en fait d'un état $T=1$ en-dessous de l'IAS, ce dernier décroissant uniquement ou presque par émission γ . C'était aussi le but de cette expérience au GANIL que de confirmer ou non cette hypothèse.

En plus de ces études de mélange d'isospin, les observables extraites d'une telle expérience de spectroscopie de décroissance, tels que les énergies des états IAS et des protons, permettent d'avoir accès aux excès de masse des IAS, et ainsi tester des modèles locaux de masse (comme l'IMME), et/ou déterminer de manière plus précise des masses de noyaux plus exotiques non accessibles expérimentalement.

Expérience et résultats préliminaires

Les noyaux d'intérêt ont été produits par fragmentation d'un faisceau de ^{58}Ni , séparés par le spectromètre LISE3, puis implantés dans un détecteur silicium à pistes (DSSSD), entouré par quatre détecteurs germanium EXOGAM pour la mesure des rayonnements γ . Les protons et particules β de décroissance étaient détectés directement dans le DSSSD, les protons s'arrêtant dans le détecteur tandis que les particules β ne déposent qu'une partie de leur énergie.

L'analyse des données de cette expérience est en cours. La statistique obtenue sur les noyaux d'intérêt est élevée, environ $1 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$ et $6 \cdot 10^5$ implantations, respectivement pour les noyaux ^{52}Ni , ^{44}Cr et ^{48}Fe . L'analyse préliminaire de cette expérience montre une raie γ de ^{44}Cr correspondant à la transition depuis l'IAS, encore jamais observée du fait d'une statistique limitée lors de l'expérience précédente réalisée également à GANIL/LISE3. Si l'intensité de la raie d'émission proton provenant de l'IAS peut être déterminée, le rapport expérimental I_p/I_γ depuis l'IAS pourra être extrait et ainsi comparé au travail théorique de N. Smirnova et al.

Pour le cas particulier de ^{52}Ni , les données confirment que le proton de haute intensité ne vient effectivement pas de l'IAS et donc qu'il n'y a pas ou très peu de mélange d'isospin dans l'IAS de ^{52}Co . Cela permettra également de contraindre les modèles nucléaires incluant des termes de brisure de symétrie d'isospin.

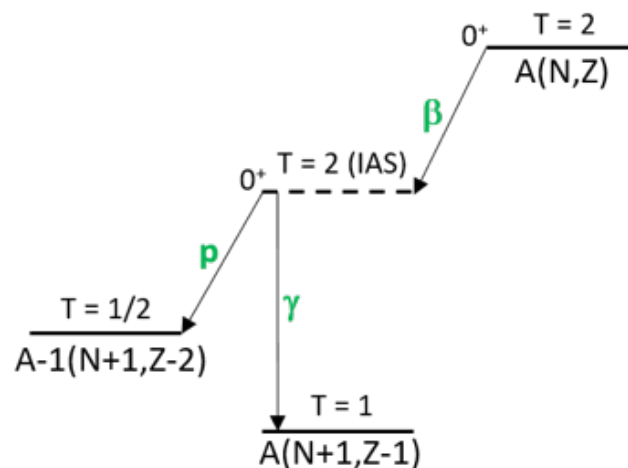


FIGURE 13

Exemple de schéma de décroissance d'un noyau $T_z = -2$

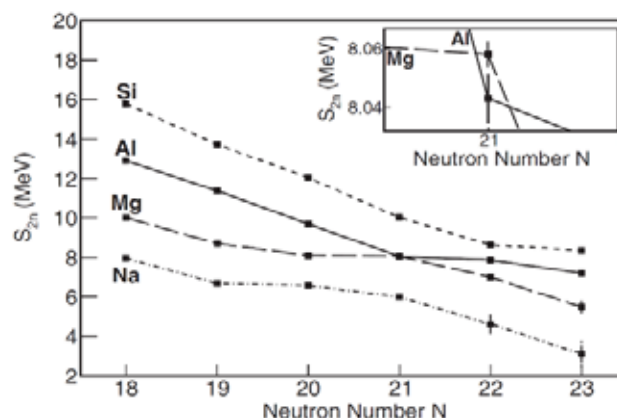


FIGURE 14

Energie de séparation de deux neutrons en fonction du nombre de neutrons pour Si, Al, Mg et Na.

Dans les années 70, des mesures de masse ont mis en évidence une augmentation inattendue des énergies de liaison de $^{31,32}\text{Na}$. Pour la première fois, la possibilité qu'un nombre magique puisse disparaître loin de la stabilité a été suggérée. Depuis, l'étude et la compréhension de l'évolution des fermetures de couches pour les noyaux exotiques est l'une des préoccupations majeures des physiciens nucléaires, expérimentateurs et théoriciens. Dans le cas de $N=20$, la réduction du gap permet des excitations de neutrons sur les orbitales pf , ces configurations étant appelées états intrus. Pour certains noyaux très déformés, ces états intrus correspondent à l'état fondamental du noyau, formant ce qu'on appelle l'îlot d'inversion. La compréhension du mécanisme d'inversion et les limites de cet îlot sont encore étudiées et non élucidées aujourd'hui.

Dans ce contexte, des mesures de masse ont été réalisées dans cette région à ISOLDE/CERN avec le dispositif ISOLTRAP. La spectrométrie de masse donne accès, via l'énergie de liaison du noyau atomique, à l'énergie de séparation de deux neutrons, S_{2n} , dont l'étude systématique le long de chaînes isotopiques permet de mettre en évidence des effets de structure. On peut voir par exemple sur la **figure 14** que la diminution de S_{2n} entre $N=20$ et $N=22$ est moins importante pour Mg et Na que pour Si, ce qui est une indication de la disparition de la fermeture de couche.

De plus, comme montré dans l'insert de la **figure 14**, les courbes S_{2n} pour Al et Mg se croisent à $N=21$, ce qui n'arrive nulle part ailleurs sur toute la carte des noyaux. Le noyau ^{34}Al a son état fondamental 4^- , et un isomère 1^+ , état intrus (**figure 15**). Si cet état intrus était en fait l'état fondamental (le noyau ^{34}Al serait donc dans l'îlot d'inversion) alors la masse mesurée de l'état 4^- serait erronée

et expliquerait ce croisement de S_{2n} . C'est une des questions sur lesquelles s'est focalisée cette expérience.

Expérience

Le but de l'expérience était donc de mesurer indépendamment les énergies de liaison des états 1^+ et 4^- de ^{34}Al . Un faisceau de ^{34}Al , dans l'état 4^- , a été produit à ISOLDE par fission d'une cible d'uranium induite par un faisceau de protons de 1,4 GeV. Ce faisceau a ensuite été envoyé dans le spectromètre ISOLTRAP (**figure 15**), tout d'abord dans le RFQ pour mettre le faisceau en paquets et le refroidir, puis à travers le MR-ToF (non utilisé dans cette expérience), ensuite dans le premier piège de préparation pour la purification du faisceau et enfin dans le piège de précision pour la mesure de masse par la méthode ToF-ICR (Time of Flight – Ion Cyclotron Resonance).

En ce qui concerne la masse de l'état 1^+ , une technique moins standard a été utilisée. Sachant que la décroissance de ^{34}Mg peuple principalement cet état (**figure 15**), un faisceau de ^{34}Mg a été produit par ISOLDE et envoyé à ISOLTRAP. Dans le piège de purification, les ions ont été piégés un temps suffisant pour que les noyaux ^{34}Mg décroissent vers $^{34}\text{Al}(1^+)$, que ceux-ci soient piégés et recentrés dans le piège via des excitations RF (radiofréquence), puis envoyés vers le deuxième piège pour la mesure de masse. Cette technique est appelée "in-trap decay" et a été utilisée ici pour la première fois pour des noyaux de très courte durée de vie (26 ms pour $^{34}\text{Al}(1^+)$). La masse de ^{34}Mg a aussi pu être mesurée avec plus de précision qu'auparavant. Tous les détails des mesures et des résultats sont publiés dans [Asch¹⁹].

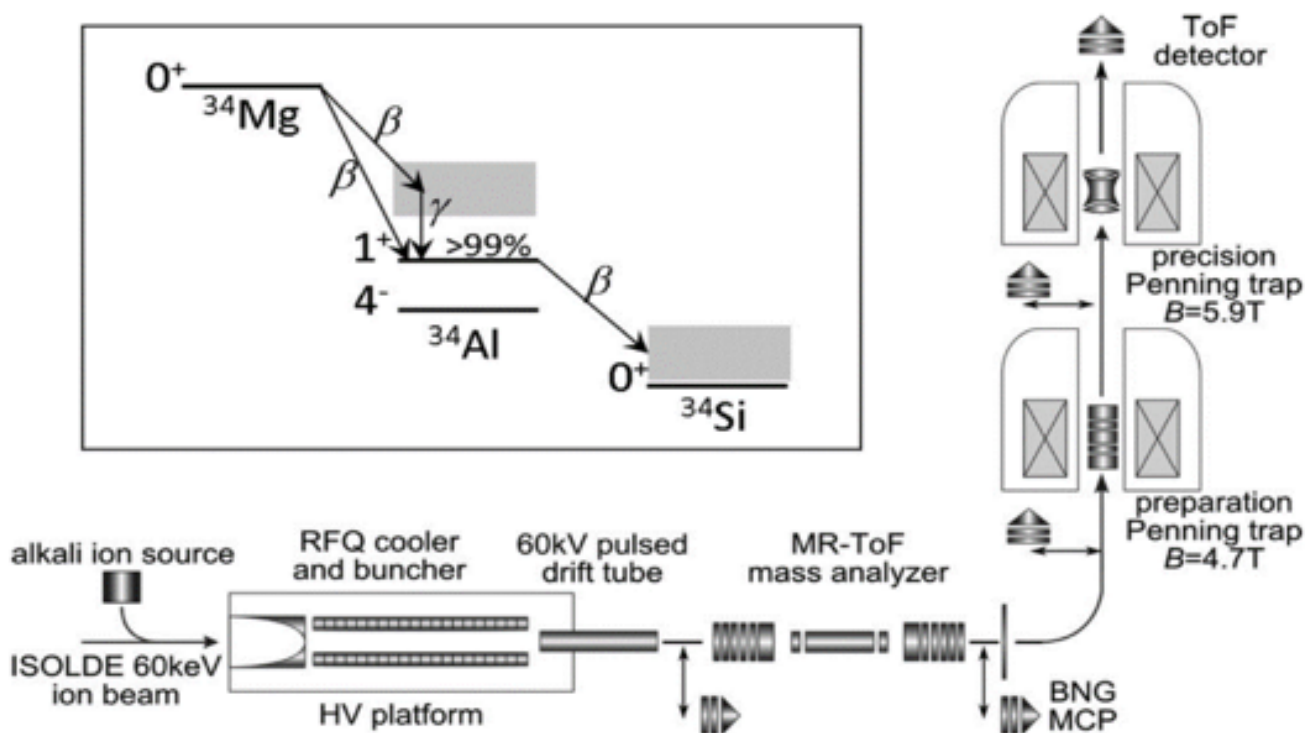


FIGURE 15

Schéma du spectromètre ISOLTRAP, composé de quatre pièges : un RFQ, un MR-ToF, et deux pièges de Penning. En insert, un schéma simplifié montrant le peuplement de l'état 1^+ par décroissance de ^{34}Mg , qui décroît ensuite sur ^{34}Si .

La technique "in-trap decay" a également été utilisée pour la première fois en utilisant deux décroissances successives. En augmentant le temps de piégeage des ions ^{34}Mg dans le piège de préparation, la production du petit-fils de ^{34}Mg , ^{34}Si , a pu être optimisée, et les ions ^{34}Si envoyés dans le deuxième piège, où leur masse a été déterminée pour la première fois de manière directe. Cette mesure n'aurait pas pu être réalisée autrement car l'élément Si est réfractaire et ne peut pas être extrait de manière rapide et efficace d'un ensemble cible-source type ISOL, raison pour laquelle la masse de ^{34}Si n'avait jamais été mesurée directement auparavant.

La **figure 16** montre une résonance ToF-ICR, dont l'ajustement permet de déterminer la fréquence cyclotron ν_c , inversement proportionnelle à la masse du noyau. Le principe consiste à exciter les ions via une tension RF appliquée sur les électrodes du piège, et dont la fréquence ν_{rf} est scannée, ce qui donne un maximum d'énergie lorsque $\nu_{rf} = \nu_c$, et donc un minimum en temps de vol entre le piège et le détecteur.

Interprétation, conclusions et perspectives

La mesure de masse de ^{34}Mg avec une précision (6,9 keV) améliorée d'un facteur 4 par rapport à la littérature a permis de confirmer la déviation importante par rapport à une expérience précédente, et confirme que le gap à $N=20$, $Z=12$ est extrêmement faible. Ceci peut être quantifié par le shell gap empirique défini par $\Delta_n = S_{2n}(Z, N) - S_{2n}(Z, N + 2)$, déterminé ici à 1,098(9) MeV.

Les mesures concernant ^{34}Al ont montré que l'état 1^+ est bien l'état isomérique et l'état 4^- l'état fondamental, confirmant ainsi le croisement unique entre les courbes S_{2n} de Mg et Al à $N=21$ (**figure 14**). Ce croisement est donc un réel effet de structure, un effet de seuil due à l'entrée dans l'îlot d'inversion, ce qui montre à quel point la déformation est importante dans les Mg comparé aux Al avec seulement un proton de moins.

Enfin, la masse de ^{34}Si a été mesurée avec une précision de 0,8 keV. La technique utilisée pour mesurer la masse de cet isotope réfractaire non accessible normalement dans une installation telle que ISOLDE ouvre de belles perspectives pour de futures mesures plus loin de la vallée de stabilité, par exemple $^{35,36}\text{Si}$, et ainsi sonder le gap $N=20$ pour $Z=14$.

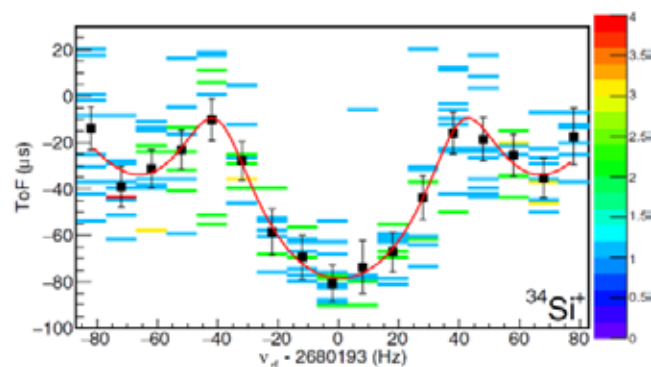


FIGURE 16

Temps de vol des noyaux ^{34}Si entre le piège et le détecteur en fonction de la fréquence d'excitation ν_{rf}

différents types de détecteurs associés au séparateur. Il a ainsi été possible de produire et d'identifier les noyaux au voisinage de la drip-line proton dans la région de masse visée (**figure 17**). Il s'agit de la première observation des noyaux ^{63}Se , ^{68}Kr et ^{67}Kr [Blan 16].

Mesure des décroissances radioactives

Les fragments sélectionnés par le spectromètre sont implantés dans l'ensemble WAS3ABi, composé de 3 DSSSD (1 mm d'épaisseur, 60x40 pistes de 1 mm). Les noyaux très riches en protons décroissent principalement par radioactivité β^+ , suivie d'une désexcitation gamma (γ) et/ou d'une émission de protons. Dans ce cas, les protons laissent toute leur énergie dans le détecteur silicium dans lequel l'ion a été implanté, ce qui permet d'en mesurer l'énergie. Néanmoins, la résolution en énergie est dégradée par l'empilement d'une fraction de l'énergie des particules β (positron), qui ne sont pas arrêtées et peuvent alors également interagir dans un des DSSSD voisins. Le dispositif WAS3ABi est entouré de l'ensemble de détecteurs germanium EURICA pour la mesure en coïncidence des raies

5

DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ 2-PROTONS DE ^{67}Kr

Après les travaux menés par l'équipe sur la mise en évidence du phénomène de radioactivité 2-protons et les expériences menées au GANIL pour l'étude de ^{45}Fe , ^{48}Ni et ^{54}Zn , nous avons proposé la recherche de nouveaux candidats, de numéro atomique plus élevé, auprès du séparateur BigRIPS au RIKEN Nishina Center, au Japon. Cette expérience s'est déroulée en 2015, lors d'une campagne exploitant la fragmentation d'un faisceau intense de ^{78}Kr . Nous avons ainsi pu produire les noyaux ^{59}Ge , ^{63}Se , ^{68}Kr et ^{67}Kr , potentiellement émetteurs 2-proton. De plus, l'analyse de la décroissance de ces noyaux a permis d'établir que ^{67}Kr se désintègre par ce mode de décroissance. L'analyse de cette expérience fait partie du travail de thèse de T. Goigoux [Goig17].

Nouveaux isotopes à la drip-line proton

Pour cette expérience, un faisceau de ^{78}Kr , d'énergie 345 AMeV et d'intensité 250 pnA, était envoyé sur une cible de béryllium. Les produits de fragmentation sont sélectionnés par le spectromètre BigRIPS (et le spectromètre ZDS). L'identification des noyaux produits est assurée par des mesures de temps de vol, de perte d'énergie et de rigidité magnétique à l'aide de

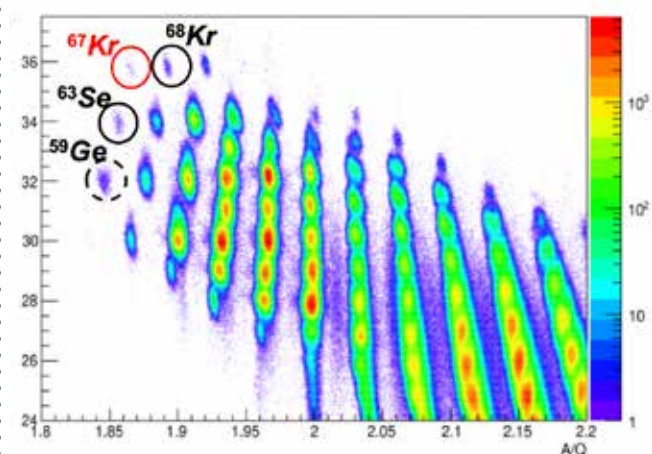


FIGURE 17

Matrice d'identification des fragments produits au cours de l'expérience : les noyaux entourés sont les candidats à la radioactivité 2-protons, les cercles en trait pleins indiquant les noyaux qui ont été observés pour la première fois.

γ de désexcitation des états peuplés par les décroissances β . L'analyse des données est effectuée en imposant une corrélation des pistes X et Y des DSSSD pour les événements d'implantation et de décroissance. Les durées de vies sont déterminées à partir de la distribution en temps des événements de décroissance après implantation du noyau analysé.

En plus de la décroissance de ^{67}Kr (voir ci-dessous), nous avons ainsi pu analyser la décroissance radioactive des noyaux présentés dans le tableau ci-contre, qui en présente les principales caractéristiques (**table 1**). Il s'agit d'une première détermination pour les noyaux ^{59}Ge , ^{63}Se , ^{68}Kr , pour lesquels les distributions en énergie des protons émis indiquent qu'ils décroissent très largement par radioactivité β et non par émission 2-protons. La décroissance des autres noyaux produits est analysée par d'autres équipes de la collaboration.

Radioactivité 2-protons de ^{67}Kr

Les données concernant la décroissance des 36 noyaux de ^{67}Kr qui ont été implantés dans le dispositif WAS3ABi sont présentées **figure 18**.

La distribution en énergie des particules chargées présente un pic marqué à 1,69 MeV, pour lequel aucune coïncidence avec une particule β n'est observée dans les DSSSD voisins du détecteur d'implantation. Avec une efficacité de détection de ces particules β de 67%, la probabilité de les manquer tous est de l'ordre de 5×10^{-6} , indiquant qu'il s'agit de la transition correspondant à la radioactivité 2-proton [Goig16]. Par ailleurs, l'absence de rayonnement γ d'annihilation d'un positon (à 511 keV) appuie cette conclusion. Le rapport d'embranchement estimé pour cette transition 2P est de $37 \pm 14\%$. A partir de la durée de vie du noyau, cela implique des durées de vies partielles de 21 ± 12 ms et 10 ± 6 ms respectivement pour la radioactivité 2-protons et la décroissance β , les 2 modes étant en compétition. La durée de vie partielle de la décroissance β est en accord avec la prédiction à 11 ms de la *Gross theory*.

La durée de vie par émission 2-protons a été comparée aux prédictions théoriques du modèle hybride [Brow19] utilisé pour les autres noyaux donnant lieu à cette radioactivité. Ce modèle associe les durées de vie d'un modèle à 3 corps décrivant la dynamique d'émission et les amplitudes des configurations possibles pour la structure du noyau émetteur calculées dans le formalisme du modèle en couches. Alors que l'accord était satisfaisant pour ^{45}Fe et ^{54}Zn , ce modèle donne une durée de vie de 660 ms pour ^{67}Kr , en désaccord d'un facteur 20 avec le résultat expérimental.

Cet important désaccord a suscité des travaux théoriques pour tenter d'expliquer la durée de vie mesurée. Une première hypothèse [Gri17] suggère une situation transitoire, pour ce noyau, entre une émission directe et simultanée des 2 protons et une émission séquentielle, selon la position de la résonance intermédiaire ($^{66}\text{Br}+p$). Un autre calcul récent [Wang18] dans le formalisme du modèle Gamow Coupled Channels suggère un effet de la déformation nucléaire. Une expérience mesurant les corrélations en angle et en énergie des protons, prévue avec le dispositif ACTAR TPC, doit tenter de confirmer ou non ces hypothèses.

isospin	noyau	$T_{1/2}$ (ms)	BR_p (%)
-5/2	^{63}Se	13.2 ± 3.9	100
	^{59}Ge	13.3 ± 1.7	100
-2	^{68}Kr	21.6 ± 33	89^{+11}_{-10}
-3/2	^{69}Kr	27.8 ± 1.6	93^{+7}_{-6}
	^{65}Se	34.2 ± 0.7	93^{+7}_{-6}
	^{61}Ge	40.7 ± 0.4	87 ± 3
	^{57}Zn	45.7 ± 0.6	86 ± 3
	^{55}Cu	55.4 ± 1.8	-
-1	^{64}As	69.0 ± 1.4	-
	^{60}Ga	70.8 ± 2.0	-
	^{56}Cu	80.2 ± 0.7	-
-1/2	^{65}As	130.3 ± 0.6	-
	^{63}Ge	153.6 ± 1.1	-

TABLE 1

Durées de vie ($T_{1/2}$) et rapports d'embranchement total proton (BR_p) obtenus dans l'analyse des décroissances radioactives

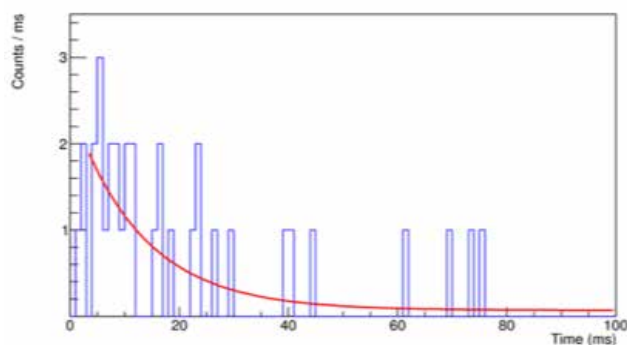
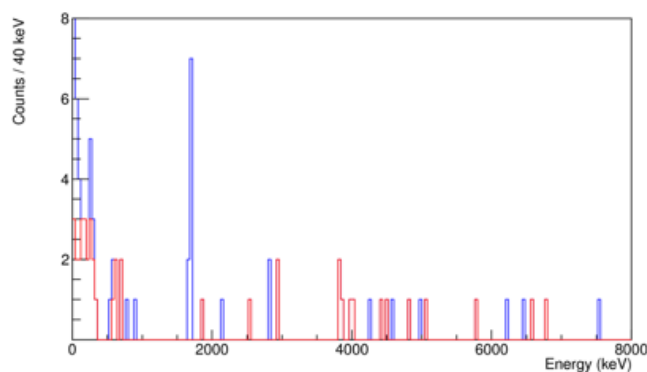


FIGURE 18

La distribution en temps des événements de décroissance après l'implantation des noyaux permet d'estimer la durée de vie de ^{67}Kr .



Distribution en énergies des particules chargées des événements de décroissance après implantation de ^{67}Kr . Les données en rouge indiquent les décroissances pour lesquelles un signal β en coïncidence a été mesuré dans un des DSSSD voisins de celui d'implantation. L'absence de coïncidence β pour le pic observé à 1,69 MeV indique qu'il s'agit de la transition par émission de 2 protons.

Le dispositif ACTAR TPC a été utilisé pour la première fois en mai 2019 (expérience E690, GANIL) dans une expérience sur la radioactivité par émission de proton de l'état isomérique 10^+ de ^{54}Ni . Le succès de la prise de données nous a permis d'étendre les mesures au cas similaire de radioactivité proton de l'état isomérique $19/2^-$ de ^{53}Co .

Motivation

La décroissance par émission de proton de l'état isomérique ^{54m}Ni ($J^\pi = 10^+$, $E^* = 6,457$ MeV, $T_{1/2} = 152$ ns) a été observée de manière indirecte par la désexcitation gamma du 1^{er} état excité ($J^\pi = 9/2^-$) dans le noyau fils, ^{53}Co , par la collaboration RISING [Rudo08]. Cette transition, d'énergie $E_\gamma = 1,3$ MeV, implique un proton de moment angulaire $l = 5$. D'autres branches de décroissance par émission de proton de cet état doivent alors être ouvertes, qui ne pouvaient pas être observées dans l'expérience RISING, en raison de l'absence d'émission gamma : l'émission de proton vers l'état fondamental ($J^\pi = 7/2^-$) de ^{53}Co ($l = 7$, $E_p = 2,6$ MeV), ainsi qu'une très faible branche d'émission 2-protons. L'étude de la décroissance de cet état a pour objet la comparaison de la structure de ^{54}Ni et ^{54}Fe afin de caractériser la symétrie d'isospin dans les calculs de modèle en couches [Rudo15].

En raison d'une production suffisante de ^{54}Ni , une partie du temps de faisceau a été utilisée afin d'étudier de façon similaire l'émission de protons de l'état isomérique $J^\pi = 19/2^-$ ($E^* = 11,45$ MeV, $T_{1/2} = 247$ ms) de ^{53}Co . Pour ce noyau, qui est le premier cas de radioactivité 1-proton observé, la transition vers l'état fondamental ($J^\pi = 0^+$, impliquant un proton avec $l = 9$) a été observée [Cern72], avec une énergie $E_p = 1,59$ MeV. Une transition vers le 1^{er} état excité ($J^\pi = 2^+$, $E^* = 840$ keV) devrait également être observée, à une énergie de transition de l'ordre de 750 keV.

Dispositif expérimental

Les noyaux d'intérêt sont produits par fragmentation d'un faisceau de ^{58}Ni sur une cible de nickel naturel, et sélectionnés par le spectromètre LISE3. Une fraction de ces noyaux (de l'ordre de 1 pour 1000) sont produits dans leur état isomérique, ce qui est favorisé par un réglage asymétrique de la sélection en moment au premier plan focal du spectromètre. L'identification des fragments (figure 19) est réalisée à l'aide de la technique standard basée sur des mesures de perte d'énergie dans des détecteurs silicium et de temps de vol réalisées à l'aide de la radiofréquence des cyclotrons et de détecteurs placés le long du parcours dans la ligne LISE3.

En sortie du spectromètre LISE3 et des détecteurs silicium d'identification, les fragments sont implantés dans le volume actif du dispositif ACTAR TPC (figure 20), rempli de gaz Argon- CF_4 à une pression de l'ordre de 200 à 300 mbar. Le choix de CF_4 comme *quencher*, au lieu du CH_4 utilisé couramment dans nos expériences, permet d'éviter de produire des protons diffusés par le faisceau incident, qui pourraient contaminer l'observation des protons de décroissance. La pression est ajustée pour arrêter les protons de décroissance dans le volume actif. Il est à noter que le plan de pads utilisé était celui développé sur circuit PCB standard, pour lequel de l'ordre de 5% des pads étaient défectueux.

Le temps de dérive du signal d'ionisation vers le plan de collection de la TPC étant de l'ordre de la microseconde, la décroissance de ^{54m}Ni , avec une durée de vie de 152 ns, est enregistrée en même temps que le signal d'implantation (figure 21). Pour cette raison, les pads centraux de la TPC ont été polarisés afin de réduire le signal d'ionisation à l'implantation et

réduire la distorsion du signal sur l'ensemble des pads par effet d'induction, et limiter cet effet pour la mesure du signal nettement plus faible créé par les protons de décroissance. Ceci implique en contrepartie une perte d'efficacité pour les protons émis dans l'axe du faisceau.

Pour la décroissance de ^{53m}Co , la durée de vie étant nettement plus longue, la décroissance est enregistrée dans un événement indépendant de l'implantation, et la polarisation des pads n'est alors pas nécessaire.

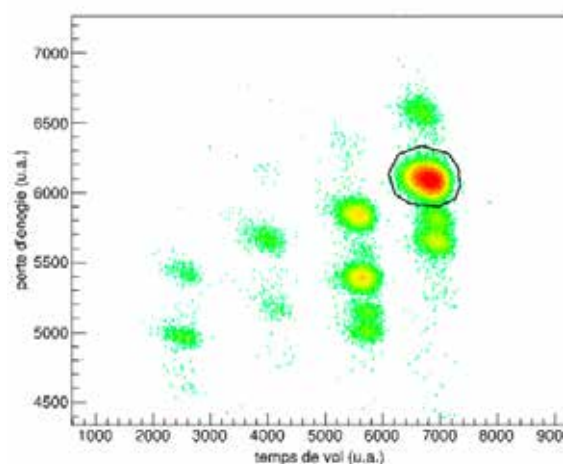


FIGURE 19

Exemple de matrice d'identification des fragments par perte d'énergie et temps de vol.



FIGURE 20

Détecteur ACTAR TPC installé en sortie de la ligne LISE3 au GANIL.

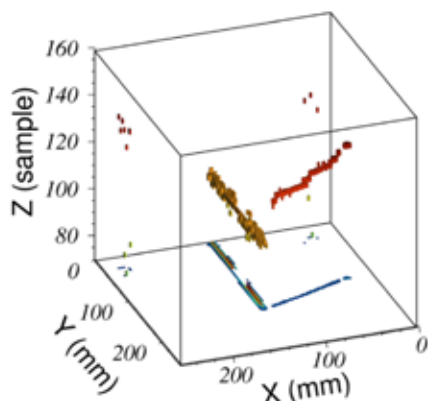


FIGURE 21

Exemple d'événement d'implantation d'un ion (parallèle à l'axe Y, en jaune) suivi de la décroissance par émission d'un proton (en rouge). La projection sur le plan XY du signal est également représentée (montrant une zone de pads défectueux dans l'axe du faisceau). La différence en Z entre le point d'implantation et le début de la trace du proton de décroissance correspond au temps de vie du noyau. (Image T. Roger, collaboration ACTAR TPC)

Résultats préliminaires

L'analyse des données est actuellement en cours, néanmoins des résultats préliminaires montrent que des protons avec deux énergies différentes ont été observés, tant pour ^{54m}Ni (figure 22) que pour ^{53m}Co . En raison des pads défectueux, l'énergie des protons est déterminée à partir de l'estimation des longueurs des traces. Il s'agit de résultats préliminaires à partir d'un traitement simplifié des données enregistrées.

Dans le cas de ^{54m}Ni , une estimation du rapport d'embranchement relatif nécessitera une simulation Geant4 pour la détermination de l'efficacité de détection afin de tenir compte du fait que les pads centraux (sous le faisceau) ne participent pas au déclenchement de l'acquisition.

Une estimation des durées de vie de ces états isomériques sera également proposée, par corrélation des événements d'implantation et de décroissance dans le cas de ^{53m}Co , et par la détermination de la différence le long de l'axe de dérive entre la trace d'implantation et celle du proton dans le cas de ^{54m}Ni .

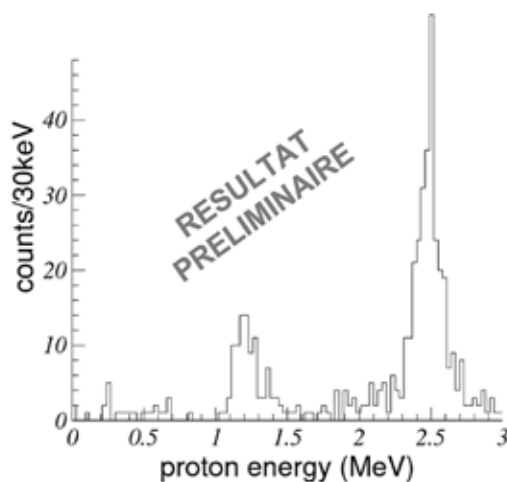
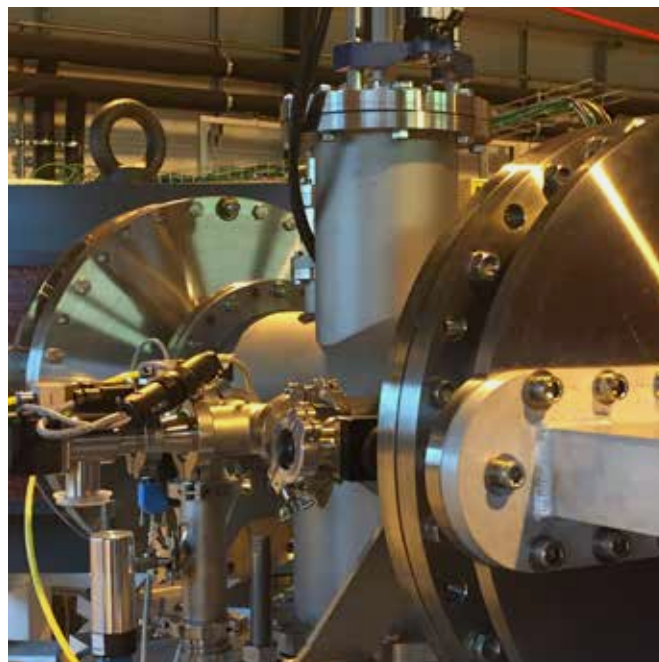


FIGURE 22

Distribution en énergie des protons observés dans la décroissance de ^{54m}Ni . (Figure B. Mauss, collaboration ACTAR TPC)



7

EVALUATION DE SECTIONS EFFICACES DE RÉACTION DE FUSION-ÉVAPORATION

Dans le cadre du projet SPIRAL2 au GANIL, une partie des noyaux exotiques seront produits par des réactions de type "fusion-évaporation" où un noyau "projectile" est envoyé sur un noyau "cible" et fusionne avec celui-ci, l'ensemble formé émettant des particules légères (protons, neutrons, particules α) et des photons pour évacuer son énergie d'excitation et arriver à son état fondamental. Le noyau final a une masse qui, aux différences d'énergie de liaison près, correspond à la somme des masses du projectile et de la cible moins la masse des particules légères émises. Due à la courbure de la vallée de stabilité des nuclides (les noyaux stables légers ont le même nombre de protons Z et de neutrons N, tandis que les noyaux lourds possèdent nettement plus de neutrons que de protons), ce mécanisme de fusion-évaporation produit des noyaux avec $N=Z$ (pour les noyaux plus légers) ou des noyaux riches en protons (pour les plus lourds).

Le CENBG était en charge de la construction d'un ensemble cible-source pour ces réactions pour le bâtiment de production de SPIRAL2. Dans ce cadre, une évaluation des sections efficaces de production de noyaux exotiques pour ces réactions a aussi été commencée en comparant des résultats expérimentaux avec des simulations. Malgré le report sine die de la construction du bâtiment de production de SPIRAL2, le travail d'évaluation a continué en le réorientant un peu.

D'un côté ce travail était directement exploitable pour les taux de production du spectromètre S3 et de l'autre, une comparaison des sections efficaces expérimentales de fusion-évaporation avec les prédictions de divers modèles était possible. C'est ce deuxième point qui sera décrit ici [BLAN18].

Dans le cadre du projet SPIRAL2 au GANIL, une partie des noyaux exotiques seront produits par des réactions de type "fusion-évaporation" où un noyau "projectile" est envoyé sur un noyau "cible" et fusionne avec celui-ci, l'ensemble formé émettant des particules légères (protons, neutrons, particules α) et des photons pour évacuer son énergie d'excitation et arriver à son état fondamental. Le noyau final a une masse qui, aux différences d'énergie de liaison près, correspond à la somme des masses du projectile et de la cible moins la masse des particules légères émises. Due à la courbure de la vallée de stabilité des nuclides (les noyaux stables légers ont le même nombre de protons Z et de neutrons N , tandis que les noyaux lourds possèdent nettement plus de neutrons que de protons), ce mécanisme de fusion-évaporation produit des noyaux avec $N=Z$ (pour les noyaux plus légers) ou des noyaux riches en protons (pour les plus lourds).

Le CENBG était en charge de la construction d'un ensemble cible-source pour ces réactions pour le bâtiment de production de SPIRAL2. Dans ce cadre, une évaluation des sections efficaces de production de noyaux exotiques pour ces réactions a aussi été commencée en comparant des résultats expérimentaux avec des simulations. Malgré le report sine die de la construction du bâtiment de production de SPIRAL2, le travail d'évaluation a continué en le réorientant un peu.

D'un côté ce travail était directement exploitable pour les taux de production du spectromètre S3 et de l'autre, une comparaison des sections efficaces expérimentales de fusion-évaporation avec les prédictions de divers modèles était possible. C'est ce deuxième point qui sera décrit ici [BLAN18].

Tout au long du projet, des sections efficaces expérimentales ont été collectées dans la littérature. Pour toutes ces combinaisons

projectile-cible (avec l'énergie incidente correspondantes) des simulations ont été conduites avec cinq programmes différents : PACE, HIVAP, GEMINI++, CNABLA et CASCADE. Les résultats des simulations ont été comparés aux données expérimentales. Le résultat principal de ce travail est qu'aucun programme de simulation ne reproduit de manière satisfaisante les données expérimentales. Aucun modèle n'est a priori meilleur qu'un autre. L'accord est le meilleur pour des masses de noyaux autour de $A=100$ et diverge pour des masses plus élevées.

Pour faire une évaluation quantitative des modèles, un facteur d'échelle a été défini par lequel il faut multiplier toutes les sections efficaces calculées pour reproduire en moyenne les résultats expérimentaux. Ce facteur d'échelle est le plus petit (4.1) pour le code PACE (figure 23), mais la dispersion des résultats calculés autour des valeurs expérimentales reste relativement grande. Le code GEMINI++ nécessite un facteur d'échelle un peu plus grand, mais la dispersion résiduelle est bien plus faible. CASCADE et CNABLA ont des facteurs d'échelle très grands et des dispersions moyennes, tandis que HIVAP a un facteur correctif raisonnablement petit, mais une dispersion grande. On pourrait alors conclure que c'est GEMINI++ qui donne, après une correction d'un facteur 5,7, le meilleur accord avec tous les résultats expérimentaux.

Une comparaison plus détaillée est donnée dans la figure 24 pour différents éléments choisis. Elle montre qu'un bon accord peut être atteint après une correction globale, même si les barres d'erreur des prédictions restent élevées.

Les facteurs correctifs déterminés dans le présent travail sont aujourd'hui utilisés pour prédire des taux de production dans des installations de fusion-évaporation telle que le LNL (Legnaro, Italie).

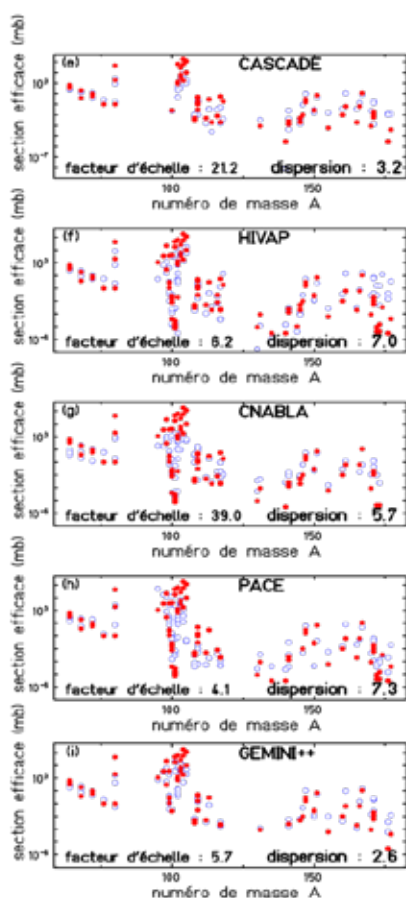


Figure 23 Comparaison des sections efficaces expérimentales (points rouges) à des résultats avec les différents codes de simulations (ronds bleus). Le facteur d'échelle est une correction générale pour un modèle donné tandis que la dispersion donne la déviation moyenne des données simulées de la valeur expérimentale.

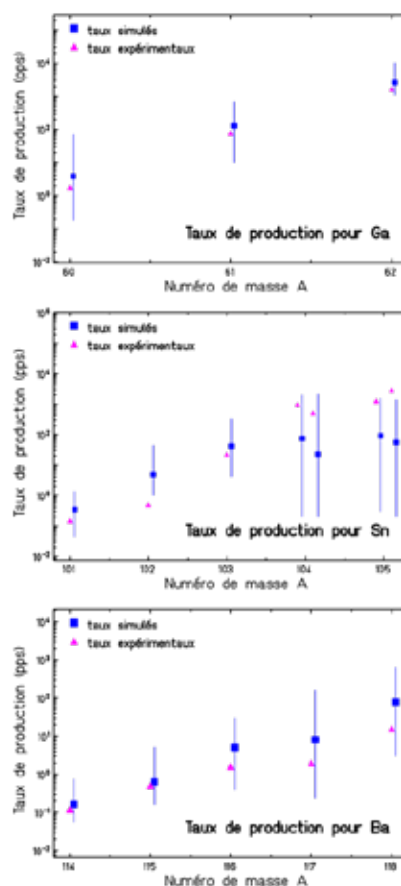


Figure 24 Comparaison entre calcul (moyenne des modèles) et données expérimentales après application d'un facteur correctif global de 7.3 pour différents éléments sélectionnés.

FIGURE 23

FIGURE 24

Motivation

Depuis les premières secondes du Big Bang qui a créé l'hydrogène et l'hélium jusqu'à la génération actuelle d'énergie dans notre Soleil qui rend possible la vie sur Terre, la physique nucléaire a joué un rôle fondamental dans l'évolution de l'univers. En effet, les réactions nucléaires (capture de neutrons, protons, alphas, fission, radioactivités, etc.) régissent la vie et la mort des étoiles, déterminent l'évolution chimique des galaxies et produisent les éléments à partir desquels nous sommes fabriqués. Une énorme quantité de données nucléaires est nécessaire afin de mieux comprendre l'évolution chimique des Galaxies, en confrontant les modélisations théoriques aux abondances observées.

Une partie de notre travail de recherche porte sur l'étude de la production de noyaux lourds riches en neutrons et l'étude de leur décroissance β , dans la région du processus r (captures neutroniques par les noyaux subissant un haut flux de neutrons) de nucléosynthèse stellaire autour de $N = 126$.

Le progrès obtenu dans ces recherches porte sur le mécanisme de réaction appelé fragmentation froide. Dans ce processus des protons sont principalement arrachés du projectile lors de la collision et une très faible énergie d'excitation est induite, très peu de neutrons étant ainsi ensuite évaporés. Ceci permet la production de noyaux lourds autour du plomb, proches de la région du processus r de nucléosynthèse stellaire près de $A = 195$ ou $N = 126$. Cette région très difficilement accessible est encore très peu explorée. Nous avons pu synthétiser et mesurer avec une grande précision les sections efficaces de production de plus de 190 noyaux lourds riches en neutrons [KURT14], dont 26 étaient produits pour la première fois. L'impact de ces résultats a ainsi motivé la sélection de notre publication comme "Editors's suggestion" à Physical Review C.

Afin d'explorer davantage cette région de la carte des noyaux, une méthode alternative à la fragmentation froide a été proposée : la réaction de transfert multi-nucléon. En particulier nous sommes intéressés par la réaction entre un faisceau de ^{136}Xe et une cible de ^{198}Pt ou ^{208}Pb à une énergie autour de la barrière coulombienne. Avec ce type de réactions, il est possible de produire des noyaux tels que ^{202}Os et étudier ses propriétés fondamentales, telles que sa durée de vie et son schéma de niveaux, via le dispositif KISS installé au RIKEN Nishina Center, Japon. Une expérience a été proposée en 2015 : "Lifetime measurement of nuclei around $N=126$ using KISS", et est en cours de prise des données.

Afin d'étudier des noyaux autour de la couche $N = 50$, et en particulier les possibilités d'occurrence de sous-couches autour de $N = 56$, pour expliquer la surproduction des éléments tels que Sr, Y et Zr dans des étoiles à très faible métallicité (UPM : *ultra poor metal stars*) une expérience a été réalisée en 2016 à l'ILL : "Measurement of the decay characteristics of ^{90}Se relevant to the r -process nucleosynthesis". Des niveaux des $^{88,89,90}\text{Se}$ y ont été identifiés pour la première fois. Par contre établir des chemins de décroissance devient une tâche compliquée dans des expériences où le rayonnement gamma des éléments contaminants pollue les spectres. En 2018 une expérience a été réalisée auprès de la collaboration ν -ball à ALTO pour mesurer les produits de la fission du ^{232}Th induits par neutron, et l'ensemble des données de ILL et ν -ball devrait permettre d'établir des schémas de décroissance des isotopes étudiés du Sélénium.

Perspectives

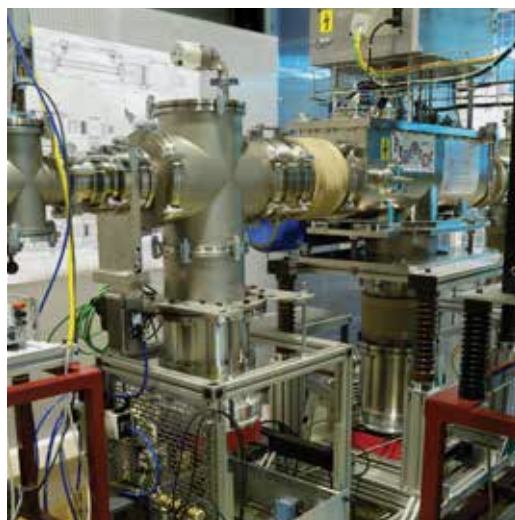
Une proposition d'expérience sur KISS au RIKEN Nishina Center a été acceptée au sein de la collaboration pour mesurer les propriétés des noyaux avec $N = 127$: " β -decay studies of $N=127$ isotones".

Une expérience sur GSI/FAIR en Allemagne (S468, New isotope search) aura lieu en avril 2020 fin d'identifier de nouveaux isotopes autour de $N=126$ et de mesurer des propriétés tels que la masse par la technique MR-TOF et des durées de vie et schémas de décroissance à partir des corrélations implantation-décroissance.

Dans le contexte de l'étude de la radioactivité 2-protons, le groupe avait développé un premier instrument de type TPC [BLAN08], [BLAN10] pour l'observation directe du phénomène et la mesure des corrélations en angle et en énergie des particules émises [GIOV07], [ASCH11], [AUDI12]. Afin de développer un instrument de nouvelle génération, nous nous sommes associés aux équipes de la collaboration MAYA (GANIL, Santiago de Compostella, KU Leuven) pour la réalisation d'un détecteur versatile pour la reconstruction de trajectoires de particules chargées. Ce détecteur répond aux besoins des études de structure et des réactions nucléaires (détecteur cible active) ainsi qu'aux besoins des mesures de décroissance radioactives par émission de particules chargées (détecteur TPC) : ACTAR TPC.

Le principe d'ACTAR TPC [ROGE18] est la reconstruction en 3D du signal d'ionisation des particules chargées le long de leur trajectoire dans le volume actif du détecteur. Un champ électrique uniforme est appliqué dans ce volume à l'aide d'une électrode de dérive et d'une cage de champ. Les électrons d'ionisation dérivent vers un plan de collection composé de 16384 pads de $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Le signal mesuré sur les pads (amplifié à l'aide d'un micromegas) donne une image de la projection en 2 dimensions (X,Y) des traces des particules. La 3^e dimension est obtenue par le temps de dérive vers le plan de pads. L'échantillonnage en temps du signal de chaque pad permet ainsi la discrétisation selon la dimension Z.

L'électronique GET [POLL18] a été spécifiquement développée pour la lecture et le traitement des signaux de ce type de détecteur dans le cadre d'une collaboration entre le CEA Saclay (circuit de lecture AGET), le CENBG (carte AsAd pour les ASICs et les ADC), le NSCL/MSU (concentration des données) et le GANIL (module trigger et horloges, acquisition de données).



Démonstrateur pour la R&D

Dans la phase de R&D pour le dispositif, deux démonstrateurs (prototypes de taille réduite, de 32x64 pads) ont été réalisés au GANIL et au CENBG, afin de valider l'ensemble des choix techniques pour les éléments du détecteur (**figure 25**) : cage de dérive, plan de pads, connectique d'extraction des signaux, acquisition et traitement des données...

Concernant l'électronique de lecture des signaux des pads, le service électronique du CENBG a eu en charge la conception de la carte front-end AsAd, qui embarque quatre circuits AGET (échantillonnage en temps et mémorisation du signal de 64 pads) et qui assure la conversion numérique des données et la configuration des circuits. Nous avons utilisé un prototype de carte AsAd pour effectuer des mesures à l'aide de générateurs de signaux afin de caractériser les données enregistrées (bruits, distorsion, effets systématiques) et pour définir les procédures de traitement nécessaires à l'optimisation de la qualité des données et à la reconstruction effective du signal d'entrée de chaque voie [Giov16].

La densité de pads du plan de collection, couplée aux contraintes de tenue mécanique aux différences de pression entre l'intérieur de la chambre et l'extérieur, a nécessité une R&D spécifique qui a conduit la collaboration à explorer deux solutions techniques : d'une part l'utilisation d'un circuit standard (PCB) collé sur une bride métallique, nécessitant un routage compliqué pour l'extraction des signaux (prototype GANIL), d'autre part une technologie innovante, proposée au CENBG, utilisant un circuit réalisé directement sur une plaque métallique avec une connexion directe de chaque pad au travers de la plaque (**figure 26**). Cette technologie a été développée en collaboration avec l'atelier PCB du CERN (réalisation du PCB et micromegas) et la société FeDD (pour la soudure des connecteurs). En parallèle, un plan de pads sur circuit PCB standard a été développé au GANIL, nécessitant un routage complexe des pads vers la connectique d'extraction qui doit permettre de coller le plan sur une bride de renfort. Cette option est aux limites de ce qui est réalisable pour un PCB : ce plan de pads a été utilisé pour les premières expériences au GANIL⁽¹⁾, mais près de 5% des pads étaient défectueux.

[1] voir contribution au rapport d'activité : "Emission de protons des états isomériques de ^{54}Ni et ^{53}Co "

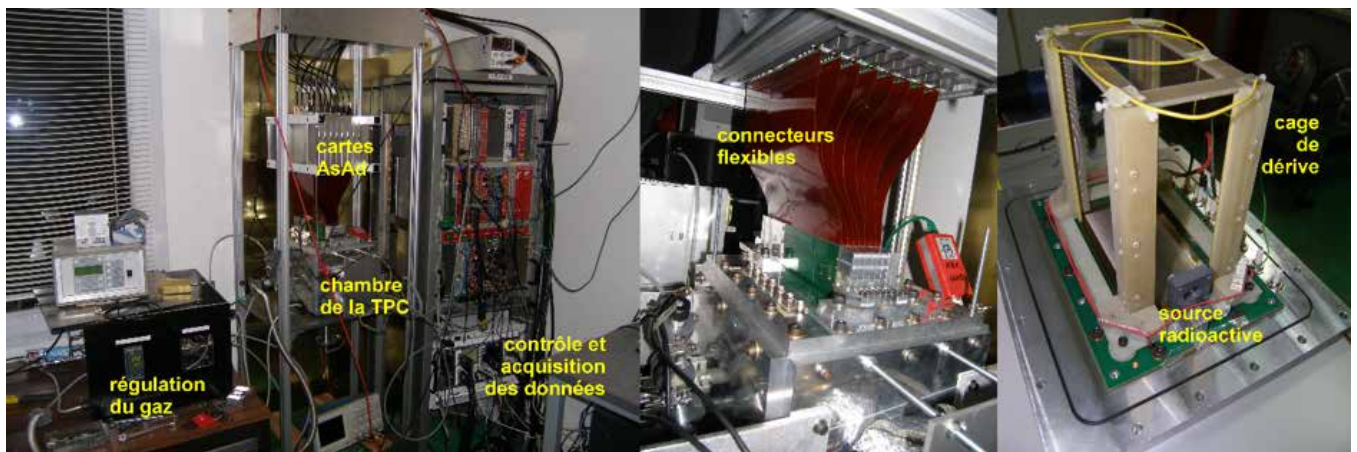


FIGURE 25 Démonstrateur ACTAR TPC au CENBG, qui a permis de réaliser des tests à l'aide de sources radioactives pour caractériser l'ensemble du dispositif.

Pour connecter le plan de pads à l'ensemble des cartes AsAd, il a été nécessaire de développer des cartes utilisant un circuit flexible (**figure 25, au centre**). Ce circuit a également deux autres fonctions : la protection de l'électronique en cas de claquage dans le détecteur et la polarisation de certains pads. Celle-ci est utilisée lorsqu'il est nécessaire de réduire le signal des pads sous le faisceau incident (mode "cible active" notamment), en réduisant la tension entre les pads en question et la grille du micromegas. Ces circuits ont été conçus au CENBG où nous les avons caractérisés (bruit induit par la capacité, test des fonctionnalités).

Le démonstrateur a ainsi permis d'effectuer de nombreux tests avec des sources radioactives (X et α) afin de valider les options technologiques développées [GIOV18].

Des résultats tout à fait satisfaisants ont été obtenus en termes de résolution en énergie et de reconstruction des traces de particules alpha. Nous avons également mené une analyse détaillée des performances du détecteur couplé à l'électronique GET [GIOV19], et développé les procédures d'analyse de données qui démontrent la capacité du dispositif à reconstruire de manière effective la distribution 3D du signal d'ionisation (**figure 27**). Une résolution en énergie de l'ordre de 85 keV a été obtenue pour des particules α de 4,8 MeV.

Réalisation des détecteurs ACTAR TPC

Pour le détecteur final, deux géométries sont considérées pour le plan de pads : un plan carré (128x128 pads, chambre dite "réaction") favorisant des trajectoires transverses longues, et un plan rectangulaire (64x256 pads, chambre dite "décroissance") pour des grandes dispersions de profondeur d'implantation et des trajectoires transverses courtes, particulièrement adaptée aux études de décroissances par émission de protons (de faible énergie) de noyaux produits sur des installations de fragmentation.

La première chambre a été réalisée au GANIL et a été utilisée dans un test (commissioning) en mode "cible active" en 2017 [MAUS19]. Les premières expériences ont eu lieu au GANIL en avril-mai 2019, l'une en mode "cible active", l'autre en mode implantation décroissance. Cette dernière a permis d'observer la décroissance par émission de protons d'états isomériques : de ^{54m}Ni ($T_{1/2} = 150$ ns, énergies de protons de 1.2 et 2.5 MeV) et de ^{53m}Co ($T_{1/2} = 240$ ms, énergies de protons de 0.7 et 1.5 MeV). Ces résultats sont particulièrement encourageants dans la perspective de l'exploitation du détecteur pour l'étude de la radioactivité 2-proton.

La construction de la chambre dite "décroissance" est actuellement en cours de finalisation au CENBG.

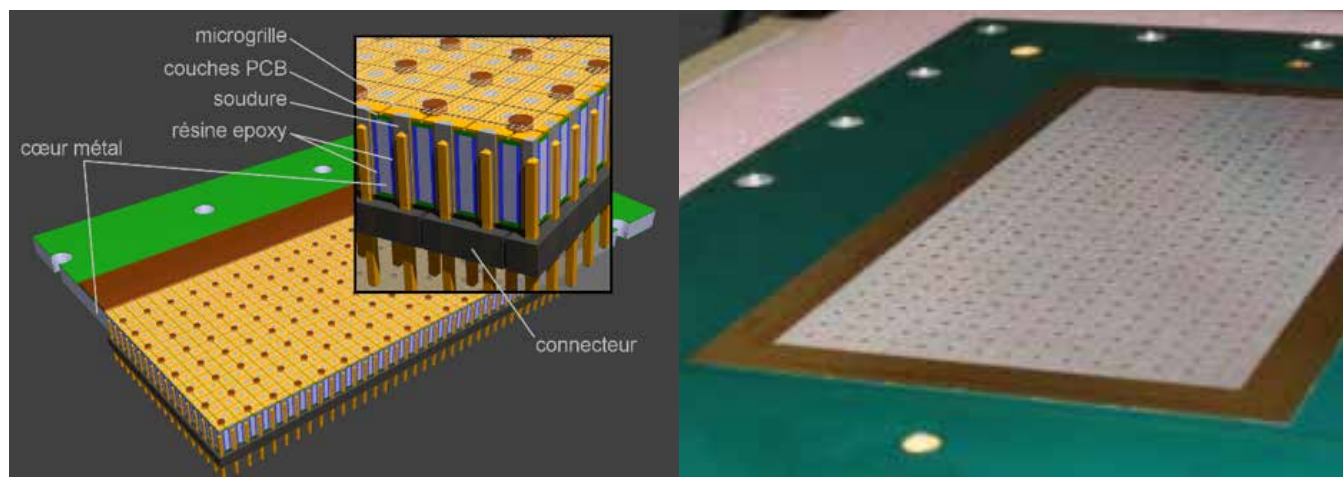


FIGURE 26

En haut, schéma de principe du plan de pads avec circuit à cœur métallique.
A bas, prototype du plan de pads utilisé sur le démonstrateur ACTAR TPC au CENBG.

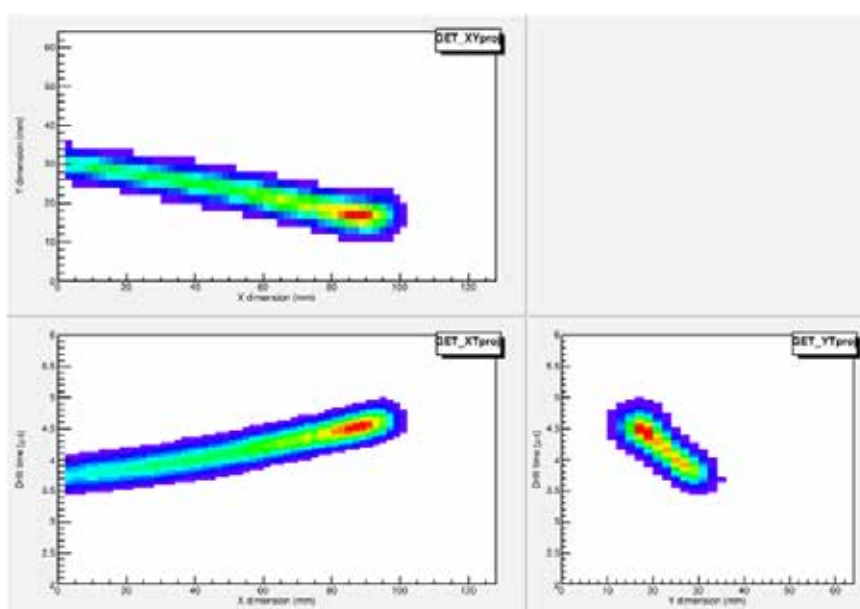


FIGURE 27

Exemple de reconstruction en 3D de la distribution du signal d'ionisation d'une particule α dans le volume actif du démonstrateur.

10

DÉVELOPPEMENT D'ENSEMBLES DE PURIFICATION ET DE STOCKAGE DE FAISCEAU RADIOACTIF : HRS ET PIPERADE

Lorsqu'une caractéristique d'un état nucléaire (durée de vie, masse, rapport de branchement d'une désintégration...) doit être mesurée avec précision, il est crucial que l'échantillon servant à la mesure soit le plus pur possible. En d'autres termes, la mesure ne doit porter que sur le noyau (voire l'état nucléaire) d'intérêt et non sur d'autres noyaux qui contamineraient l'échantillon. Aucune méthode de production de noyaux exotiques n'étant sélective, il est donc nécessaire de passer par une étape de purification entre la production des noyaux d'intérêt et la mesure de leurs propriétés. Ceci est fait de manière routinière avec des séparateurs magnétiques qui sélectionnent les particules d'un faisceau en rapport charge sur masse (q/m). Des résolutions $R=m/\Delta m$ (où Δm représente la différence de masse entre les noyaux dont on parvient à séparer

les trajectoires) de l'ordre de quelques 10^2 à quelques 10^3 sont atteintes sans trop de difficultés. Ceci est néanmoins insuffisant pour éliminer les contaminants les plus proches en masse (isobares voire isomères). Deux approches pour dépasser cette limite sont utilisées dans les développements menés par le groupe NEX dans le cadre de l'installation SPIRAL2 en construction au GANIL. La première consiste à pousser le principe de la séparation magnétique à ses limites pour obtenir un séparateur haute résolution (HRS), la seconde exploite des pièges électromagnétiques pour effectuer un piégeage sélectif en masse (GPIB et PIPERADE).

Séparateur haute résolution

Le futur HRS sera placé avant l'entrée du hall DESIR (**figure 28**) et pourra recevoir les faisceaux issus de la branche basse énergie de S^3 [KURT13], le séparateur spectromètre du projet SPIRAL2 ainsi que ceux de SPIRAL1, l'installation de basse énergie du GANIL actuel. Il est constitué de deux dipôles magnétiques de 90° , deux doublets de quadripôles, hexapôles et un multipôle avec des fonctions focalisantes et correctives afin de maximiser la section d'entrée du faisceau dans les dipôles et pour corriger les aberrations d'ordres élevés. Le séparateur est à symétrie miroir pour compenser et minimiser les aberrations. L'ensemble des éléments focalisant et correctifs sont à champ électrostatique ce qui rend les réglages indépendants de la masse. Le faisceau ne faisant que passer à travers le dispositif, la séparation est très rapide (quelques 10 μ s).

Le design optique permet d'atteindre une résolution en masse théorique $R=31000$ pour un faisceau d'émission de 1π mm.mrad. En tenant compte des imperfections de fabrication et de positionnement mécanique des différents éléments du séparateur, une résolution $R=20000$ est attendue.

L'assemblage du HRS est terminé et il est actuellement en phase de caractérisation dans le hall de montage du CENBG.

Pièges électromagnétiques

Un séparateur magnétique haute-résolution ne permet cependant de séparer complètement les isobares lorsque les masses sont trop proches et surtout si le taux de contaminants est élevé et l'émission du faisceau grande. De plus, les noyaux étudiés étant radioactifs, une partie d'entre eux vont se désintégrer entre leur séparation des contaminants et l'instant de la mesure, leurs noyaux fils (en général eux-mêmes radioactifs) devenant des contaminants de l'échantillon à mesurer. Pour pallier ceci, il est nécessaire d'avoir recours à des techniques de piégeage des ions, la plus adaptée étant l'utilisation d'un piège de Penning.

Le groupe Noyaux exotiques développe depuis 2011 un tel séparateur (**figure 29**) en collaboration avec le CSNSM d'Orsay, le LPC Caen, le GANIL et le MPIK d'Heidelberg, sous le nom de PIPERADE (Pièges de Penning pour les ions Radioactifs à DESIR) [ASCH14].

Ce système vise à concilier une grande capacité de piégeage ($>10^5$ ions par paquet) avec une résolution en masse $R>10^5$, suffisante pour éliminer les contaminants d'un échantillon de noyaux radioactifs. Le principe consiste à accumuler, purifier et stocker des paquets de noyaux radioactifs dans un piège électromagnétique.

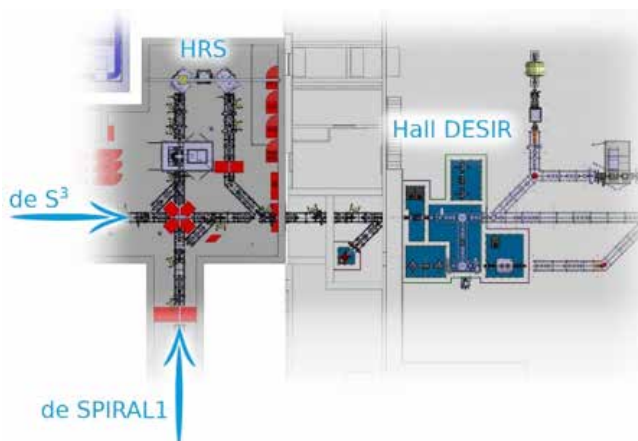


FIGURE 28

Le HRS recevra les faisceaux de S^3 (à gauche) et SPIRAL1 (en bas) et les délivrera à DESIR (à droite).

Les deux éléments clés du dispositif sont un quadripôle radiofréquence pour refroidir les ions et les grouper par paquets et un double piège de Penning, le premier servant à éliminer les contaminants de chaque paquet tandis que le deuxième permet soit l'accumulation des ions d'intérêt extraits du 1^{er} piège jusqu'à former un échantillon mesurable pour un détecteur en aval, soit une purification de très haute résolution, soit la mesure directe de la masse de l'ion d'intérêt par méthode ToF-ICR ou PI-ICR. Une option couplant un séparateur de type MR-ToF est également considérée. Une source hors-ligne de type FEBIAD produisant des faisceaux stables et divers éléments d'optique complètent le dispositif, dont un déflecteur 90° permettant de conserver les caractéristiques temporelles des faisceaux développé en collaboration avec le GANIL. La construction et la caractérisation de la ligne se font au CENBG avant un transfert au GANIL prévu en 2023.

Le quadripôle RF appelé General Purpose Ion Buncher (GPB) a pour fonction de délivrer des faisceaux refroidis et éventuellement mis en paquets à l'ensemble des lignes de DESIR. Il a ainsi des contraintes importantes d'efficacité de transmission, d'émissions transverse et longitudinale.

Le refroidissement s'effectue par collisions élastiques des ions du faisceau avec de l'hélium (gaz). La dispersion induite sur le faisceau est compensée par un potentiel RF quadripolaire dont l'effet moyen est de focaliser les ions le long de l'axe du dispositif. L'addition d'un potentiel statique permet de guider les ions dans la direction axiale et de les regrouper à l'extrémité du dispositif en créant un puits de potentiel que l'on peut temporairement "ouvrir" pour extraire les ions vers l'aval. Les premiers faisceaux refroidis ont été extraits en 2015 et le GPB remplit le cahier des charges : une émission transverse de 3π mm.mrad pour un faisceau continu extrait à 30 keV a été mesurée en accord avec les simulations SIMION menées préalablement lors de la thèse de H. Guérin (2014). La transmission atteint 80 % en mode continu (**figure 30**) comme en paquets. Des études systématiques sont actuellement en cours pour optimiser l'extraction des paquets d'ions suivant l'utilisation visée en aval en favorisant la résolution en énergie (par exemple pour la spectroscopie laser), en temps (injection dans un MR-ToF) ou un compromis entre les deux.



FIGURE 29

Le HRS recevra les faisceaux de S^3 (à gauche) et SPIRAL1 (en bas) et les délivrera à DESIR (à droite).

L'aimant supraconducteur accueillant les électrodes des pièges de Penning a été livré en juillet 2017. Le champ a ensuite été "optimisé", son homogénéité mesurée précisément dans le volume occupé par les pièges. La dérive temporelle du champ a été mesurée et corrigée à l'aide d'une bobine additionnelle insérée entre le tube à vide et la paroi interne de l'aimant (dérive résiduelle $\Delta B/B = 2.10^{-10} \text{ h}^{-1}$).

Le tube à vide accueillant les pièges a été aligné sur le champ magnétique au moyen d'un canon à électrons émettant des électrons de très faible énergie. Ils ont ainsi une trajectoire hélicoïdale de rayon très faible (quelques μm) autour des lignes de champ permettant grâce à des collimateurs et des détecteurs segmentés de réaliser un alignement précis.

À noter que ce canon à électron a été entièrement développé par les Services Mécanique et Instrumentation du CENBG.

La tour composée de deux pièges successifs et des optiques d'injection et d'extraction du faisceau, dont la conception et la réalisation ont été effectuées au MPIK Heidelberg, a récemment été insérée dans l'aimant complétant ainsi la ligne (figure 31).

Diverses méthodes de purification ont été simulées avec le code SIMBUCA pour permettre la séparation d'ions d'intérêt des contaminants dans des échantillons de grande taille (10^4 - 10^5 ions) et doivent maintenant être testées expérimentalement.

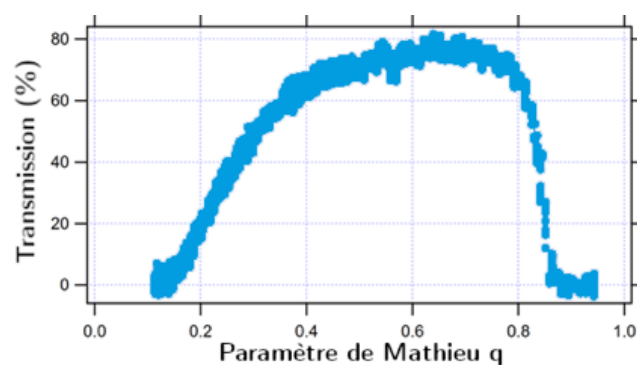


FIGURE 30

Scan en transmission du GPIB en mode continu. Le paramètre q regroupe la charge et la masse de l'ion, la tension et la fréquence RF, ainsi que le diamètre interne du RFQ. Ici, seule la tension est variée. On voit que la transmission atteint 80%.

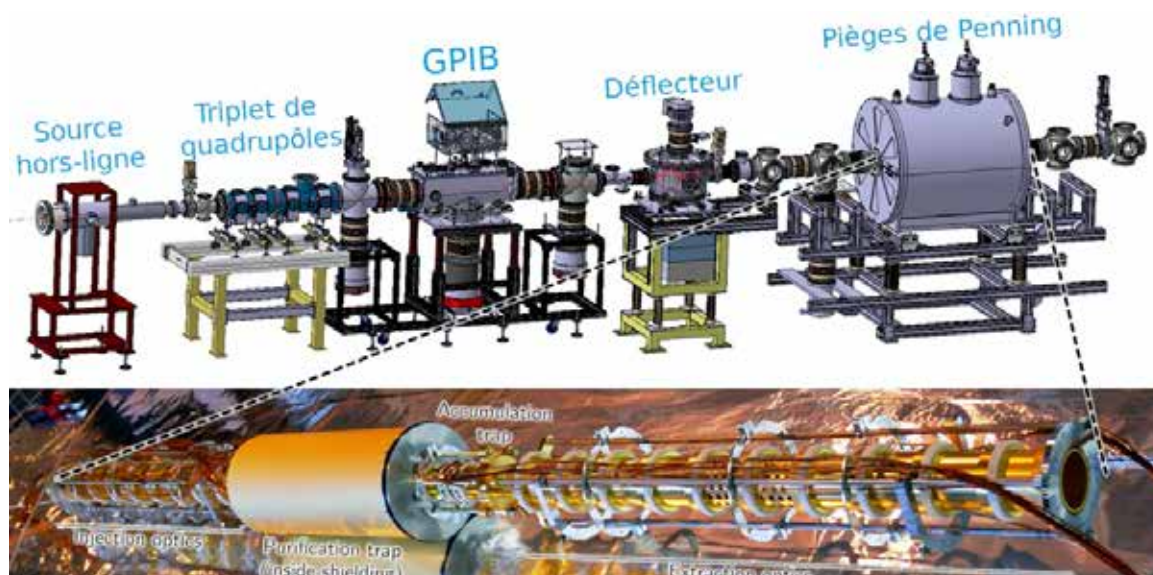


FIGURE 31

(Haut) Plan CAO de la ligne PIPERADE au CENBG. Le déflecteur placé après le GPIB est un prototype du modèle qui sera utilisé dans DESIR. AU CENBG, il permet d'envoyer également les faisceaux du GPIB vers le HRS pour tester celui-ci avec des faisceaux refroidis. (Bas) La tour comprenant les pièges et les optiques d'injection et extraction avant leur insertion dans l'aimant.

[ADEL99] E.G. Adelberger et al., Phys. Rev. Lett. 83 1299 (1999)
 [AQUA17] M. Aouadi, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2017
 [ARAU19] V. Araujo-Escalona et al., submitted to PRC (2020)
 [ASCH11] P. Ascher et al., Phys. Rev. Lett. 107, 102502 (2011)
 [ASCH14] P. Ascher et al., EPJ Web of conferences 66, 11002 (2014)
 [ASCH19] P. Ascher et al., PRC 100, 014304 (2019)
 [AUDI12] L. Audirac et al., Eur. Phys. J. A 48, 179 (2012)
 [BLAN08] B. Blank et al., Nucl. Instr. and Meth. B 266, 4606 (2008)
 [BLAN10] B. Blank et al., Nucl. Instr. and Meth. A 613, 65 (2010)
 [BLAN16] B. Blank et al., Phys. Rev. C 93, 061301(R) (2016)
 [BLAN18] B. Blank et al., Nucl. Instrum. Meth. B416 (2018) 41
 [CERN72] J. Cerny et al., Nucl. Phys. A188 (1972)
 [FINL16] P. Finlay et al., Eur. Phys. J. A 52, 206 (2016)
 [GIOVO7] J. Giovino et al., Phys. Rev. Lett. 99, 102501 (2007)
 [GIOV16] J. Giovino et al., Nucl. Instr. and Meth. A 840, 15 (2016)
 [GIOV18] J. Giovino et al., Nucl. Instr. and Meth. A 892, 114 (2018)
 [GIOV19] J. Giovino et al., soumis à Nucl. Instr. Meth. A (2019)

[GOIG16] T. Goigoux et al., Phys. Rev. Lett. 117, 162501 (2016)
 [GOIG17] T. Goigoux, thèse de doctorat, Université de Bordeaux (2017)
 [GOLD58] M. Goldhaber et al., Phys. Rev. 109, 1015 (1958)
 [GONZ19] M. González-Alonso et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 104, 165 (2019)
 [GRIG17] L.V. Grigorenko, Phys. Rev. C 95, 021601(R) (2017)
 [JACK57] J.D. Jackson et al, Nuclear Phys. 4 (1957) 256
 [KURT13] T. Kurtukian Nieto et al., Nucl. Instr. Meth. B 317, 284 (2013)
 [KURT14] T. Kurtukian-Nieto et al., Phys. Rev. C 89, 024616 (2014)
 [MAGR17] C. Magron et al., Eur. Phys. J. A 53, 77 (2017)
 [MAUS19] B. Mauss et al., Nucl. Instr. Meth. A 940, 498 (2019)
 [POLL18] E.C. Pollaco et al., Nucl. Instr. Meth. A 887, 81 (2018)
 [RUD008] D. Rudolph et al., Phys. Rev. C 78, 021301(R) (2008)
 [RUD015] D. Rudolph et al., GANIL E690 proposal (2015)
 [ROGE18] T. Roger et al., Nucl. Instr. Meth. A 895, 126 (2018)
 [SMIR17] N. Smirnova et al., PRC 95 054301 (2017)
 [WANG18] S.M. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 120, 212502 (2018)
 [WU57] C.S. Wu et al., Phys. Rev. 105, 1413 (1957)

RADIOACTIVITÉ ET ENVIRONNEMENT

Plateforme
PIAGARA

ABSTRACT

The RADEN group is comprised of research related to nuclear energy and towards the detection and impact of certain radioactive isotopes in the environment. The measurement of noble gases (He, Ne, Ar, Kr and Xe) by the PIAGARA platform facilitates research into the diffusion of noble gases in materials from the nuclear industry (UO_2 , B_4C), radioisotopes of krypton (^{81}Kr and ^{85}Kr) as radioactivity tracers or for dating ancient subsurface water bodies. Studies have also been conducted to determine how noble gases have shaped the paleoclimatic evolution of north Aquitaine over the last 30,000 years. Concerning the 'microbiology of nuclear related environments', the group investigates the presence and diversity of microbial communities in the legacy Rophin uranium mine environment (Puy de Dome) to identify the impact of natural and anthropogenic radioactivity on the microfauna. To complement these studies, metagenomics tools are used by our collaborators to give insights into how river and sediment microbial communities have been impacted by legacy mining activities.

RÉSUMÉ

L'équipe RADEN a conduit des recherches en relation avec l'énergie nucléaire et sur la détection et l'impact de certains isotopes radioactifs dans l'environnement. Les études s'appuyant sur la mesure des gaz rares (He, Ne, Ar, Kr et Xe) sont réalisées sur la plateforme PIAGARA. Elles portent notamment sur la diffusion des gaz rares dans des matériaux de l'industrie nucléaire (UO_2 , B_4C), sur la mesure des isotopes radioactifs du krypton (^{81}Kr et ^{85}Kr) comme traceurs de l'activité nucléaire ou pour la datation des eaux souterraines. Des études ont également été menées pour déterminer à l'aide des gaz rares l'évolution paléo-climatique au Nord de l'Aquitaine au cours des derniers 30 000 ans. Concernant le volet "microbiologie d'environnements liés au nucléaire", dans le cadre de la Zone-Atelier Territoires Uranifères, l'équipe a initié des recherches sur la présence et la diversité bactérienne dans l'environnement de l'ancienne mine d'Uranium de Rophin (Puy de Dôme) afin de mieux comprendre l'impact de la radioactivité naturelle ou anthropique sur la microfaune. La complémentarité de nos méthodes culturales avec des techniques de métagénomique utilisées par nos collaborateurs ont permis de mettre en évidence une population bactérienne modifiée dans les sédiments de rivières impactés par les activités minières.

PERMANENTS

Gregory CANCEL
Rémi FAURE
Eric GILABERT
Denis HORLAIT
Bernard LAVIELLE
Claire SERGEANT
Bertrand THOMAS
Marie-Hélène VESVRES

DOCTORANTS

Guillaume HOLUB

CDD

Nicolas DEVERT
Julie REYNAUD
Adam WILLIAMSON



COLLABORATIONS

BRGM Nouvelle Aquitaine

CEA-DAM (Bruyères-le-Châtel)

CEA-DEN (Cadarache)

CEA-DEN (Saclay)

CEMTHI (Orléans)

ENSEGID (Bordeaux INP)

Sorbonne Université & IMPMC

Université de Bordeaux – PACEA, France

Université de Clermont-Auvergne/LPC, GEOLAB et LMGE, France

Université de Nantes/Subatech, France

Université de Nice/ICN, France

Université de Strasbourg/IPHC, France

INTRODUCTION

Les activités de recherche menées au sein de l'équipe peuvent se décliner suivant deux axes principaux qui relèvent pour le premier en partie du Master Projet (MP) de l'IN2P3 "Irradiation des Matériaux du Nucléaire (IrrMaNu)" et pour le deuxième du MP "RadioNucléides dans le Biotope (RNUB)".

Axe 1 : Datation, environnement et énergie nucléaire

Les recherches s'appuient sur la mesure des gaz rares (He, Ne, Ar, Kr et Xe) et sont réalisées au sein de la plateforme analytique adossée PIAGARA. Elles concernent d'une part la caractérisation des matériaux du nucléaire et d'autre part plusieurs thèmes relevant de la géochimie terrestre comme la datation des eaux souterraines anciennes à l'aide des isotopes radioactifs du krypton, l'étude des paléo-températures des eaux de recharge des aquifères anciens et l'étude du piégeage du Xe dans le manteau terrestre.

Axe 2 : Microbiologie d'environnements liés au nucléaire (RNUB)

Nous nous intéressons au rôle des communautés bactériennes dans l'environnement (eaux, sédiments, sols) d'anciens sites miniers d'uranium français, dans le cadre de la Zone Atelier Territoires Uranifères (ZATU) : influence de la radioactivité anthropique (sites Te-NORM) sur la structuration des communautés, la diversité métabolique, les interactions avec les radionucléides.

MESURES ISOTOPIQUES
DES GAZ RARES

PARTICIPATION À
LA ZONE-ATELIER
TERRITOIRES URANIFÈRES
(ZATU)



Comportement des gaz de fissions dans UO_2 en présence de défauts d'irradiation

Le dioxyde d'uranium, UO_2 , est le principal combustible utilisé dans les réacteurs nucléaires et en particulier dans les 58 REP (réacteurs à eau pressurisé) en France. Les réactions de fission produisent de nombreux éléments dont 15% sont des gaz rares, essentiellement du Xe et du Kr. Leur faible solubilité va entraîner une précipitation sous forme de bulles qui va engendrer un gonflement du combustible et une augmentation de la pression interne dans les crayons. Ceci va nuire aux propriétés thermiques et mécaniques, mais aussi aux critères de sûreté du combustible en réacteur.

Il est donc nécessaire de comprendre les modifications de la microstructure par les réactions de fission qui génèrent d'importants défauts ponctuels (lacunes, interstitiels, Schottky...) et d'amas de défauts (cavités, boucles de dislocations). C'est pour cela qu'une démarche multi échelles a été entreprise au DEC (CEA Cadarache) depuis plusieurs années. Elle est basée sur des caractérisations expérimentales fines et des modélisations avancées.

Le cadre expérimental de notre collaboration repose sur la réalisation d'études dites à effets séparés dont les objectifs sont d'identifier les mécanismes de migration des gaz et d'appréhender leur interaction avec les défauts d'irradiations. La partie identification des défauts a été faite au CEMTHI sur un accélérateur de positons couplé à un spectromètre d'élargissement doppler qui permet de sonder les défauts induits dans les premières centaines de nanomètres. La technique PAS (Positron Annihilation Spectroscopy) a permis de mettre en évidence l'apparition de défauts lacunaires (essentiellement d'uranium) augmentant avec l'irradiation. À hautes fluences ($> 5.10^{13}$ at/cm²) il y a apparition de cavités nanométriques. Lors des recuits, les défauts mobiles forment de plus gros complexes, amas de cavités ou bulles (figure 1).

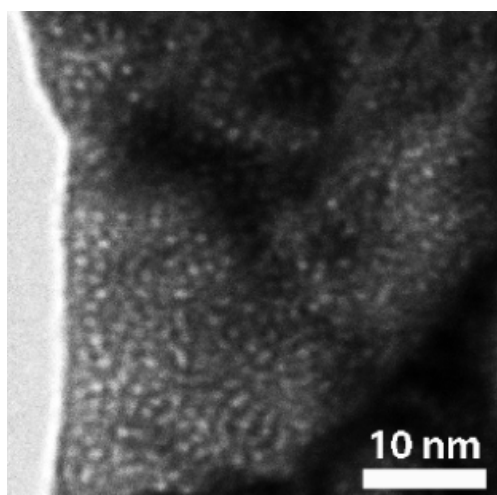


FIGURE 1

Observation MET d'un échantillon implanté à 5.10^{14} Xe/cm² et recuit sous Ar-H₂ à 800 °C. Chaque zone blanche est un amas de Xe.

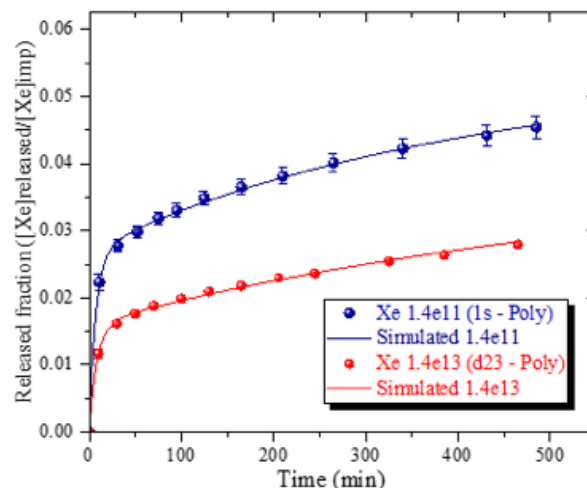


FIGURE 2

Relâchement du xénon à 1300 °C dans 2 échantillons irradiés à 2 fluences. En trait plein, simulation du relâchement [GERA18]

Pour décrire le transport des gaz rares dans UO_2 , des expériences de recuits ont été menées. Tout d'abord les échantillons subissent des implantations ioniques dans lesquelles différents paramètres sont étudiés : la microstructure de l'échantillon, le type d'ion implanté, l'énergie et la fluence des ions, l'énergie et la fluence d'une co-, pré- ou post-irradiation de façon à créer différentes concentrations en défauts induits. Les cinétiques de relâchement du gaz sont évaluées par spectrométrie de désorption thermique (TDS) avec notre plateforme PIAGARA. Deux protocoles ont été utilisés : i) à température constante (en général 1300 °C pendant 8h) et ii) par paliers de température entre 600° et 1400 °C entre 2 h et 6 h. Le premier protocole permet de mettre en place un modèle de cinétique de relâchement et de déterminer les coefficients de diffusion intrinsèque du gaz et leurs évolutions en fonction des différents paramètres expérimentaux. Le deuxième protocole permet d'établir des lois de variation du coefficient de diffusion en fonction de la température et ainsi déterminer des courbes d'Arrhenius pour en extraire des énergies d'activation régissant la migration du gaz et d'identifier les mécanismes opérants. Ces données seront ensuite comparées et/ou injectées dans les codes de calculs à l'échelle atomique.

Sur la figure 2 sont représentées des courbes typiques de relâchement du Xe dans UO_2 à 1300 °C pour 2 fluences d'implantation. Chaque courbe peut être interprétée comme 3 processus. Dans un premier temps, une bouffée apparaît systématiquement au début du relâchement et qui est due à un effet de surface. Cette bouffée disparaît en général au bout de 30-60 min. Ensuite, on observe un relâchement lié à un processus de diffusion intrinsèque. Enfin, pour ajuster les courbes expérimentales avec un modèle de transport, il faut inclure un processus de piégeage progressif des gaz rares dans les défauts structuraux du matériau. L'effet de la dose se traduit sur les courbes par un piégeage plus important et donc un relâchement plus faible, la diffusion intrinsèque n'étant pas affectée. Pour décrire ces courbes, on introduit un modèle de diffusion basé sur les lois de Fick (Equations ci-après). Ce modèle comprend 2 populations. $C(x,t)$ est la concentration des gaz rares qui peuvent diffuser avec le paramètre D et donc être relâchés au cours du recuit. $v(x,t)$ est la concentration en gaz piégés au taux k_1 . $B(t)$ est une fonction analytique qui permet de modéliser la bouffée.

$$\begin{cases} \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -B(t) \times C(x,t) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right) - k_1 \times C(x,t) \\ \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = k_1 \times C(x,t) \end{cases}$$

Le deuxième type d'expérience concerne des recuits isothermes par paliers successifs de températures. La modélisation de ces relâchements permet de déterminer les variations des coefficients de diffusion en fonction de la température. Un exemple est donné sur la **figure 3** où on observe une rupture de pente à 1200°C. À basse température, la migration du gaz est assistée par les défauts induits par l'irradiation alors qu'à haute température la diffusion du gaz est due aux lacunes thermiques et plus précisément aux lacunes d'uranium.

Ce travail a été financé par NEEDS-matériaux sur la période 2015-2019, l'IN2P3 (via le soutien au Master Projet IrrMaNu) et sur un contrat d'accompagnement de la thèse de Marie Gérardin avec le CEA-Cadarache. Cette thèse de l'université d'Orléans a été soutenue en décembre 2018 et les résultats principaux liés à ces travaux de thèse [GERA18] seront bientôt publiés. Enfin depuis 2018, un financement par le programme européen INSPYRE est effectif, l'objectif étant d'étudier l'influence de la stoechiométrie d' $\text{UO}_{2\pm x}$ sur la diffusion des gaz rares.

Diffusion de l'hélium dans le carbure de bore (B_4C)

Le carbure de bore (B_4C) est couramment utilisé en milieu nucléaire comme absorbeur de neutrons suivant la réaction $^{10}\text{B} + ^1_0\text{n} \Rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$. Dans les réacteurs à neutrons rapides (RNRs), la quantité de ^4He générée pourrait atteindre ~10% mol. en fin de vie de l'absorbeur. L'étude du comportement d'He dans B_4C est donc primordiale dans le cadre du développement des RNRs.

Ainsi notre équipe a été sollicitée en 2017 par D. Gosset pour réaliser des expériences sur des B_4C implantés en He. Ce travail a été financé par NEEDS-MATABS et a en outre servi de test en conditions extrêmes (échantillons au-delà de 2000°C) pour L2PAON (cf. rapport plateforme PIAGARA).

Durant cette étude, nous avons notamment réalisé des rampes contrôlées entre 600 et 2000°C pour définir les différentes températures et mécanismes de relâchement de He (grâce à

la modélisation des courbes) ainsi que des plateaux successifs à températures croissantes afin d'extraire des données chiffrées sur les cinétiques de diffusion (énergies apparentes d'activation E_a des processus de diffusion notamment), voir **figure 4**.

Les principales conclusions [HORL19, GILA20] sont les suivantes :

- La diffusion intragranulaire d'He dans B_4C est associée à une E_a de 2,6-3,1 eV.
- Une fraction des He, fraction qui croît avec la fluence d'implantation, se piège lors de l'implantation ou de leur diffusion dans des défauts ponctuels ou des agglomérats (bulles) d'He. Pour les taux de productions et température des cœurs de RNRs, la quasi-totalité de l'hélium resterait ainsi piégée dans le matériau.
- Au-delà de 1200°C, ces He commencent à s'échapper de leurs pièges, donc du matériau. En conditions accidentelles entraînant un échauffement anormal du cœur, un relâchement massif d'He serait donc réalisé. L'utilisation de B_4C à petits grains pourrait cependant repousser à plus haute température un tel relâchement gazeux.

Ce travail a été financé par le programme NEEDS-MATABS et par l'IN2P3 (via le soutien au Master Projet IrrMaNu).

Chimie du xénon et du krypton dans les conditions du manteau terrestre

^aCENBG, ^bSorbonne & IMPMC, depuis 2018

Depuis près d'un demi-siècle, le problème dit du "xénon manquant" a été établi : les atmosphères terrestres et martiennes souffrent d'un déficit en xénon important par rapport aux autres gaz rares (~90%), en comparaison notamment des concentrations relatives obtenues dans les corps chondritiques (météorites représentatives de la composition du système solaire lors de sa formation). En outre cette déplétion en Xe est plus marquée pour ses isotopes légers.

Le xénon, et le krypton dans une moindre mesure, bien qu'ayant des couches électroniques de valences saturées, possèdent grâce à la polarisabilité de leur cortège électronique une réactivité chimique, en particulier avec l'oxygène. Notamment il a été démontré ces dernières années par C. Sanloup [CREP19] que les conditions de pression et température du manteau terrestre permettaient à certains de ses constituants (sanidine, olivine, quartz) d'incorporer chimiquement le xénon voire le krypton. Cependant, si un piégeage chimique en profondeur du xénon est en accord avec la déplétion atmosphérique de cet élément, ceci n'explique pas sa plus forte déplétion en isotopes légers.

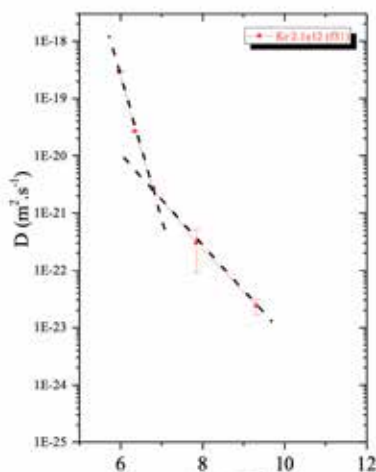


FIGURE 3

Diagramme d'Arrhenius de la diffusion du Kr dans UO_2 avec des recuits par paliers successifs.

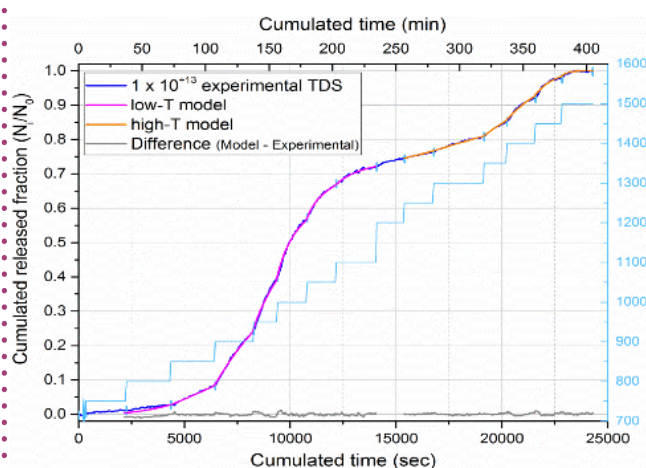


FIGURE 4

Courbe de relâchement d'hélium implanté à la fluence de $1 \times 10^{13} \text{ at.cm}^{-2}$ dans un B_4C larges grains (30-60 μm) pour des isothermes successives croissantes. Détails disponibles dans [HORL19]

Pour tenter de déterminer si l'incorporation chimique du xénon dans le manteau terrestre peut s'accompagner d'un fractionnement isotopique en faveur des éléments légers, une collaboration a été initiée en 2018 par C. Sanloup. La démarche expérimentale consiste à réaliser à Sorbonne des synthèses minérales en présence de xénon (et/ou krypton) dans les conditions PT du manteau, puis à caractériser la localisation de ces gaz dans les matériaux. Si une incorporation chimique de gaz rare est détectée (comme c'est le cas dans la **figure 5**), il est alors intéressant de réaliser au CENBG par TDS la mesure précise de la composition isotopique du Xe (et/ou Kr) piégé et de la comparer à celle du gaz ayant été utilisé lors de la synthèse. Ceci a été réalisé sur des échantillons qui ont tous montré l'absence de fractionnement isotopique (**figure 6**), vraisemblablement car la majorité du Xe contenu dans les échantillons l'étaient sous la forme de bulles (points blancs dans la **figure 5**), masquant ainsi un éventuel fractionnement effectif dans les phases incorporant chimiquement et de manière homogène du Xe (phase grise claire dans la **figure 5**).

L'important est ailleurs, car il s'agissait surtout de démontrer la faisabilité expérimentale du projet. Ceci a été réalisé en 2018 dans le cadre d'un financement DEFI-ISOTOP de la Mission pour l'Interdisciplinarité du CNRS. La faisabilité ayant été démontrée, nous avons candidaté et obtenu en 2019 un financement PRIME80 du CNRS comprenant une bourse de thèse débutant le 01/10/2019. Bien sûr pour éviter les phénomènes de sursaturations (bulles), les prochaines expérimentations concerneront principalement des synthèses en présence de Xe (et/ou Kr) "dilué".

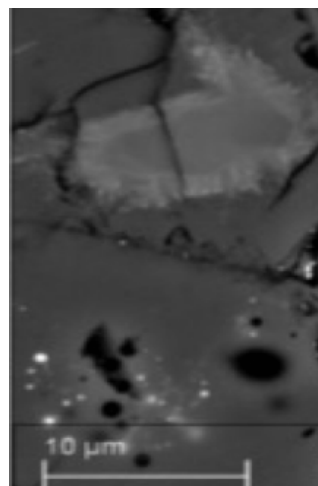


FIGURE 5

Image MEB d'un échantillon de sanidine synthétisée à 3.5 GPa - 1100 °C. La zone grise claire (feldspath ferrique) contient de manière homogène du Xe.

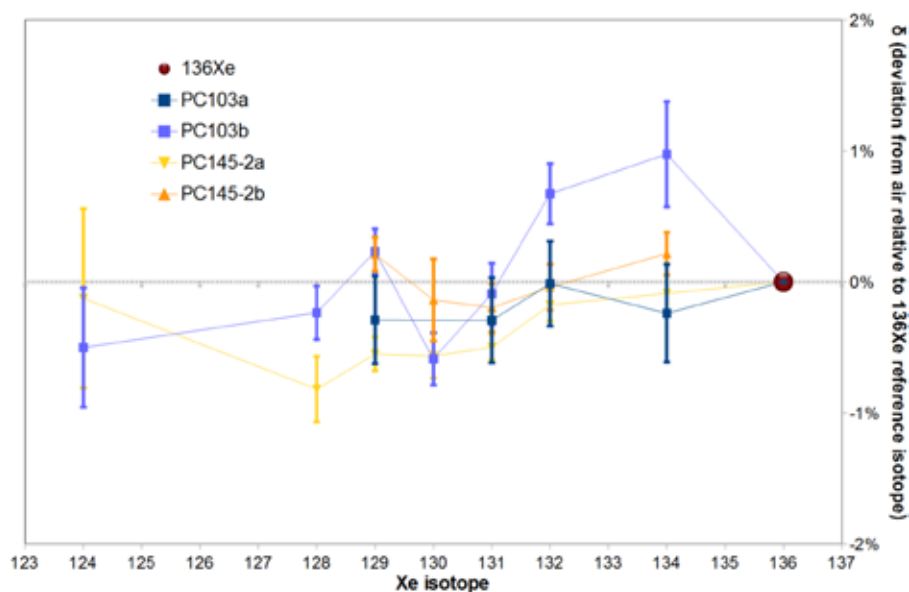


FIGURE 6

Analyses isotopiques dans des échantillons de sanidine sursaturés en Xe. On montre de manière reproductible l'absence de fractionnement isotopique.

Etude des variations paléoclimatiques de la partie Nord du Bassin Aquitain et leur impact sur la recharge des eaux souterraines

Les eaux souterraines, largement exploitées en Aquitaine, constituent une ressource stratégique à fort enjeu socio-économique. La bonne gestion de ces eaux implique une connaissance approfondie des réservoirs sollicités et du fonctionnement hydrodynamique des différentes nappes qui composent cet ensemble. L'intérêt de ces nappes profondes réside dans leur qualité et leur faible sensibilité aux aléas climatiques actuels. Avec des temps de résidence allant de quelques années à plusieurs dizaines de milliers d'années, ces aquifères se sont rechargés sous des conditions climatiques très variées constituant de remarquables archives paléo-climatiques.

L'objectif de cette étude a donc été de reconstruire, pour la partie Nord du Bassin Aquitain, les variations climatiques passées en déterminant simultanément le temps de résidence des eaux souterraines et la température moyenne qui régnait pendant la période de recharge.

Cette étude multi-traceurs s'appuie sur un partenariat entre laboratoires universitaires (CENBG, G&E-Bordeaux INP, PACEA), et le BRGM, le Conseil Général de Gironde, l'AEAG (Agence de l'Eau Adour-Garonne). L'analyse des gaz rares He, Ne, Ar, Kr, Xe a été menée au CENBG. Les autres traceurs comme le ^{14}C qui permet de déterminer le temps de résidence des eaux, le deutérium et les isotopes de l'oxygène ont été mesurés par les laboratoires G&E et le BRGM.

Les gaz rares sont considérés comme de très bons traceurs en hydrogéologie car ils présentent l'avantage d'être peu sensibles à leur environnement proche du fait de leur grande inertie chimique. Ils n'interviennent ainsi dans aucun processus chimique ni activité biologique. Les gaz rares dissous dans les eaux souterraines ont une origine essentiellement atmosphérique. Leurs concentrations en solution résultent d'équilibres avec leurs composantes atmosphériques selon la loi de Henry et sont uniquement fonction des conditions physiques qui régnaient dans la zone de recharge pendant toute la période d'infiltration des eaux (température, pression qui varie avec l'altitude, salinité de l'eau). Par exemple, la concentration du Xe dissous peut augmenter de 40% lorsque la température passe de 15°C à 5°C. Une fois la zone saturée atteinte, la concentration des gaz rares dissous est normalement préservée du fait de la pression hydrostatique. Cela permet notamment de déterminer a posteriori les conditions moyennes de température lors de la période de recharge de l'aquifère. A ces concentrations dissoutes initiales peuvent venir s'ajouter des isotopes d'origine radiogénique comme l'⁴He provenant de la décroissance radioactive de l'uranium, du thorium et l'⁴⁰Ar du ⁴⁰K.

Les mesures de gaz rares ont été réalisées par la technique de la spectrométrie de masse dans des prélèvements d'eau de l'ordre de 28 cm³, effectués dans des tubes de cuivre connectés à la sortie du forage.

Au total, 19 mesures de gaz rares ont été effectuées dans des eaux prélevées pour 14 forages distincts. Le choix des forages visait à obtenir des données de paléo-températures en couvrant une large gamme d'âge des eaux du Bassin Nord Aquitain allant de 3 000 ans (Before Present) à 32 000 ans (BP). Ainsi, 9 prélèvements ont été effectués dans les aquifères de l'Oligocène, 2 dans l'Eocène, 1 dans l'Aquitainien, et 1 dans le Campanien.

En associant les temps de résidence des eaux souterraines (déterminés à partir des mesures de ¹⁴C) aux températures de recharge déduites de la mesure des gaz rares, il a été possible d'établir des courbes de paléo-températures en fonction de l'âge des eaux. Les résultats sont présentés par la **figure 7** en fonction des âges ¹⁴C, en distinguant les différents aquifères étudiés.

On peut ainsi mettre en évidence un écart de température de l'ordre de 5,4°C entre le dernier maximum glaciaire (il y a 16 000 à 20 000 ans) et l'actuel. Outre les gaz rares, le ¹⁴C et les isotopes de l'oxygène et du deutérium ont pu être mesurés dans plus de 120 prélèvements d'eau. Cette étude a fait l'objet de plusieurs communications lors de conférences internationales et d'une publication en 2019 dans Hydrogeology Journal [SALT19].

Mesure en Ultra-Trace des isotopes Radioactifs du Krypton (Projet MUTIRAK)

Le krypton possède six isotopes stables et deux isotopes radioactifs de longue période, le ⁸¹Kr et le ⁸⁵Kr. Avec une période de 229 000 ans, le ⁸¹Kr s'avère être un chronomètre idéal pour dater les eaux souterraines ou les glaces polaires anciennes couvrant une gamme d'âges allant de 50 000 ans à 800 000 ans. Il est produit presque exclusivement dans l'atmosphère terrestre par le rayonnement cosmique. Relativement aux autres isotopes radioactifs de longue période également utilisés comme chronomètres, tels que le ¹⁴C (5 730 ans), le ³⁶Cl (301 000 ans) ou l'¹²⁹I (17 Ma), l'utilisation du ⁸¹Kr présente des avantages très importants. En raison de la grande inertie chimique des gaz rares et du très grand volume que représente le réservoir atmosphérique, l'abondance de ⁸¹Kr relativement aux autres isotopes de Kr dans l'atmosphère est homogène à l'échelle de la planète et reste peu sensible aux variations d'intensité du rayonnement cosmique dues notamment à la

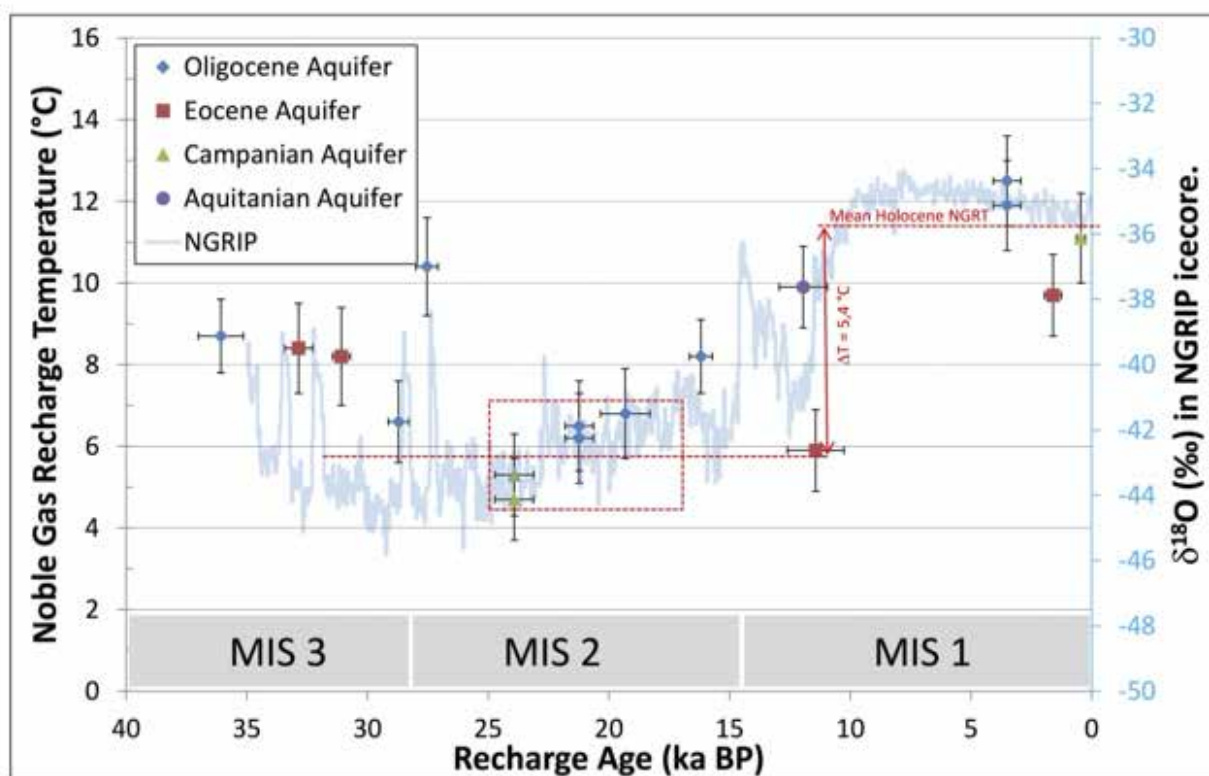
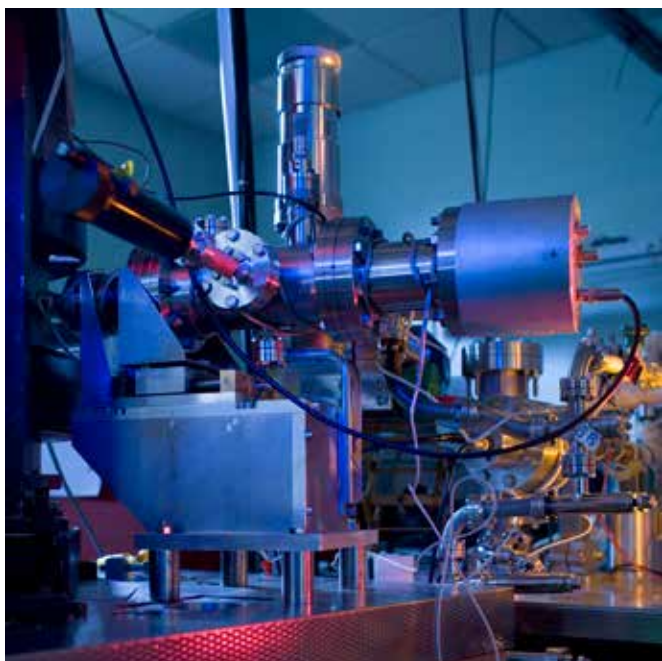


FIGURE 7

Évolution des paléotempératures au nord du Bassin aquitain établies à partir des mesures en gaz rares. Le profil de référence NGRIP (North Greenland Ice Core Project) établi à partir des rapports isotopiques de l'oxygène est également présenté (courbe turquoise) pour comparaison.



modulation solaire. Le rapport d'abondance $^{81}\text{Kr}/\text{Kr}$ peut ainsi raisonnablement être considéré comme constant et égal à $(5,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-13}$ au cours du dernier million d'années.

Le ^{85}Kr (10,77 ans), qui est un produit de fission nucléaire, peut également être utilisé pour la datation des eaux souterraines récentes (<50 ans) mais aussi comme traceur de l'activité nucléaire militaire et civile.

La détection de ces deux isotopes dans les échantillons environnementaux représente un véritable challenge technologique extrêmement difficile à relever en raison d'une part de leur très faible abondance dans l'atmosphère (quelques milliers pour ^{81}Kr à quelques centaines de milliers d'atomes pour ^{85}Kr par litre d'air ou d'eau) et d'autre part des rapports d'abondance $\text{Kr}/^{81}\text{Kr}$ et $\text{Kr}/^{85}\text{Kr}$ extrêmement élevés respectivement de l'ordre de 10^{13} et 10^{11} .

L'équipe RADEN s'est fixée comme objectif l'analyse du ^{81}Kr et du ^{85}Kr dans seulement un litre d'air ou une vingtaine de litres d'eau. Cela a conduit au développement, au cours de ces dernières années, d'une ligne d'extraction et de purification des gaz extraits de l'air ou de l'eau, et de trois spectromètres de masse spécialement dédiés.

L'analyse isotopique en ultra haute sensibilité met en œuvre pour la partie source d'ions la technique de l'ionisation résonante du Kr par un laser UV (RIS) couplée à un concentrateur cryogénique. L'analyse en masse est réalisée par temps de vol. Avec une limite de détection inférieure au millier d'atomes de Kr, la sensibilité extrême de cet instrument est environ 100 fois supérieure à celle d'un spectromètre de masse conventionnel à secteur magnétique.

Pour atteindre ce niveau de performance, il est nécessaire de limiter à quelques millions d'atomes le volume de Kr à analyser. Une étape préalable très importante d'enrichissement isotopique est donc nécessaire afin réduire d'environ 8 ordres de grandeur les rapports d'abondance $\text{Kr}/^{81}\text{Kr}$ et $\text{Kr}/^{85}\text{Kr}$. Deux spectromètres de masse ont ainsi été développés permettant de réaliser deux enrichissements successifs. Le premier instrument utilise un secteur électrostatique couplé à un secteur magnétique permettant une double focalisation du faisceau. Accélérés à 7kV les ions de Kr sont implantés après séparation en masse dans une cible d'Al. La cible est ensuite placée dans une cellule sous vide, où les ions implantés aux masses 81 et 85 sont sélectivement relâchés par ablation laser. Ce dispositif permet un premier enrichissement d'un facteur 103 à 104 avec des rendements d'implantation des isotopes de l'ordre de 50%. Les

atomes de Kr extraits sont ensuite introduits dans un deuxième spectromètre de masse, où ils sont à nouveau accélérés (7 kV) et implantés dans une nouvelle cible d'Al. Cet instrument, dont la construction vient de s'achever en 2019, utilise un large secteur magnétique de 90° permettant un deuxième enrichissement d'un facteur de l'ordre de 10^4 .

L'ensemble du protocole est aujourd'hui en cours d'optimisation et de test pour une mise en œuvre dans les mois qui viennent. Ce travail a donné lieu à plusieurs présentations à l'international (conférences invités et colloques) et à deux publications [GILA16, LAVI16].

2

MICROBIOLOGIE D'ENVIRONNEMENTS LIÉS AU NUCLÉAIRE

Biodiversité microbienne environnementale à proximité d'anciens sites miniers d'uranium français

Cette thématique entre dans le cadre de la Zone Atelier "Territoires Uranifères dans l'arc Hercynien : Vie sous rayonnement ionisant d'origine naturelle" (ZATU) labellisée par l'INEE le 1^{er} janvier 2015 (pour 5 ans), et en cours de renouvellement pour 2020-2024. Notre équipe y participe depuis sa création et Claire Sergeant appartient au comité de pilotage depuis le début.

L'objectif de la ZA est de développer une démarche pluridisciplinaire confrontant les points de vue de biologistes, chimistes, géographes, écologues, géologues, médecins, physiciens, sociologues sur les questions que pose la vie dans des environnements caractérisés par une irradiation chronique d'origine naturelle, ou naturelle renforcée (comme l'environnement d'anciens sites miniers d'uranium). Le programme de recherche de la ZA se décline autour de trois axes thématiques centrés sur les SHS (société et territoires uranium), la radiochimie (caractérisation, comportement et transfert des radionucléides, y compris par l'action de la composante microbiologique des milieux environnementaux) et la biologie (effet des radiations sur les systèmes vivants).

En collaboration avec plusieurs équipes de recherche de l'IN2P3 (LPC Clermont, Subatech Nantes), de l'INC (Institut de Chimie de Nice) et de l'INEE (Laboratoire Microorganismes Génome Environnement, Clermont-Ferrand), deux projets de recherche autour de l'ancien site minier de Rophin (Areva, Puy de Dôme) ont été financés en 2015 par la Mission pour l'Interdisciplinarité du CNRS (BioMi, porté par Claire Sergeant) et en 2017 par NEEDS-Environnement (TREMLIN, porté par Clarisse Mallet du LMGE).

L'ancien site minier uraniumifère de Rophin est un site d'extraction d'uranium exploité par le CEA (1948-1955) sur 2,7 ha qui comportait 3 types de chantiers : un chantier minier souterrain, un chantier de traitement des minerais et un chantier de stockage des résidus miniers. Depuis la fin de l'exploitation, le site a fait l'objet de travaux de réaménagement. Actuellement, la mine n'est plus visible en surface mais de l'eau d'infiltration s'écoule vers la surface par un tuyau et se déverse dans un fossé qui rend la zone humide. La zone est actuellement classée ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement), avec une activité globale de 0,31TBq et pour radionucléide majeur le radon 226. La zone ICPE surveillée par AREVA est à présent entourée de clôtures grillagées : nous n'y avons eu accès que dans le cadre du projet BioMi en 2014 - 2015.

Le premier projet (BioMi) visait, tout en fédérant les équipes, à réaliser un inventaire exhaustif des bactéries présentes dans des zones humides marquées (en aval) et non marquées (en amont) proches de l'ancienne mine de Rophin, pour étudier

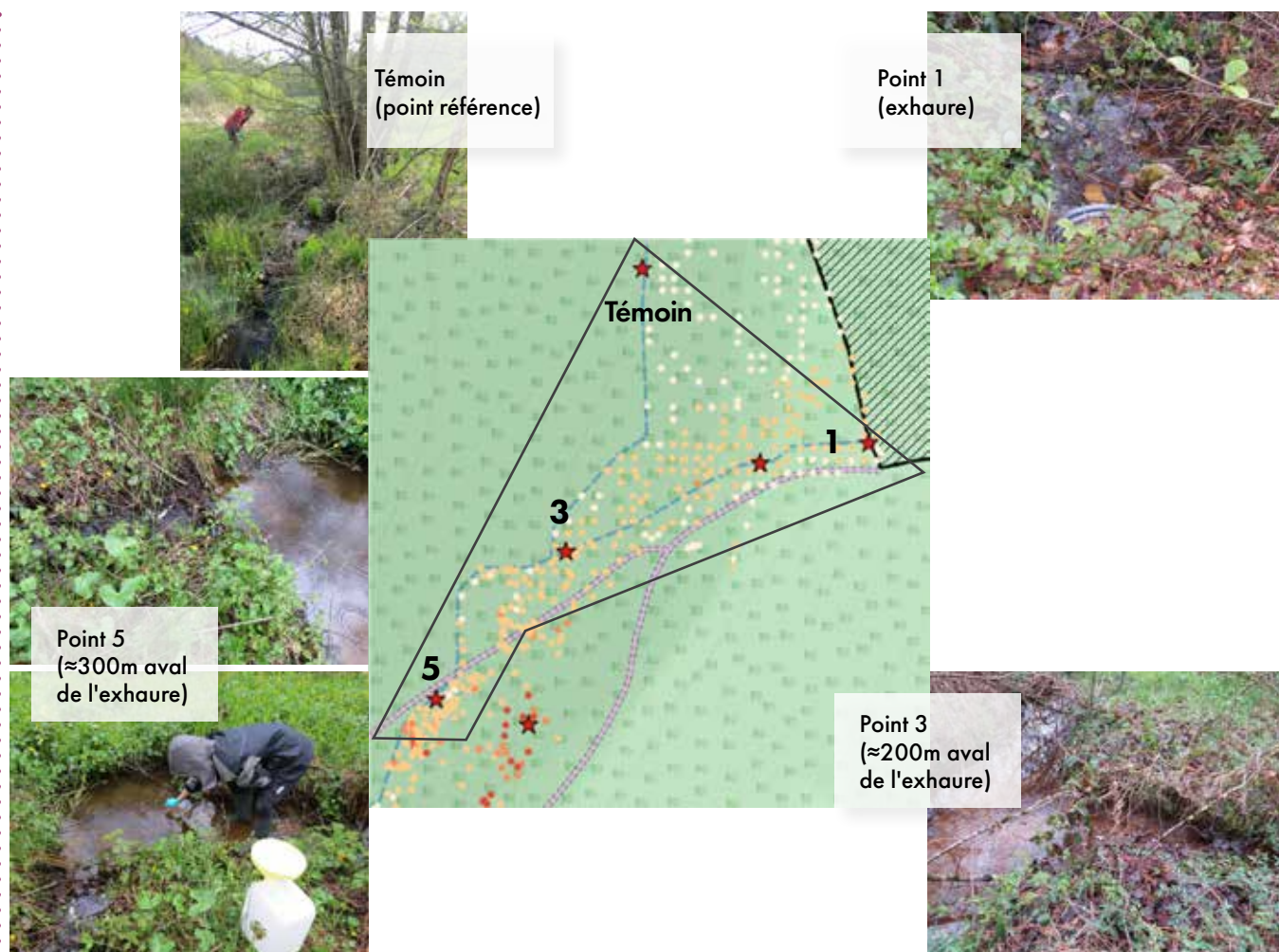


FIGURE 8 Prélèvements en aval de la mine de Rophin

l'effet de la présence et de la nature des radionucléides sur les populations. Pour cela, notre équipe a procédé à l'isolement et à l'identification de plusieurs centaines de souches bactériennes cultivables. De façon complémentaire, le LMGE a fait l'analyse métagénomique pour l'étudier en relation avec la nature et la quantité des radionucléides présents, et avec la composition minéralogique et physico-chimique de ces sols (Subatech, BRGM Orléans). Nous avons ainsi pu isoler et identifier 128 Unités Taxonomiques Opérationnelles (UTOs) bactériennes différentes (de 4 phyla), présentes dans les sols humides de ce fossé contaminé (jusqu'à 35 Bq/g sol sec, de ^{226}Ra). D'autre part, le séquençage haut débit, à partir des ADN totaux des sols, a révélé 3010 séquences par échantillon; 2019 UTOs de 23 phyla différents ont été déterminés. Les majoritaires sont les Proteobacteria, Acidobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria, Planctomycetes et Chloroflexi. L'analyse des abondances relatives des UTOs majoritaires a montré que les teneurs en radionucléides ne sont pas les seuls éléments discriminants; il est possible que la composition des sols ait un impact plus important sur la diversité que le niveau de radioactivité dû à la présence d'uranium. Du fait de l'impossibilité de retourner sur le site d'Areva, ces résultats préliminaires ne pouvant être dupliqués, ils n'ont fait l'objet que de communications dans des congrès.

Le deuxième projet (TREMPIN) a positionné son territoire de prélèvement à l'aval de la zone ICPE (hachuré sur la **figure 8**), plus accessible, pour évaluer de façon significative les effets des radioéléments sur la diversité structurale et fonctionnelle des communautés microbiennes dans des sédiments en les

découplant des effets des autres filtres environnementaux.

Des quatre échantillons de sédiments prélevés en avril 2017, 96 souches bactériennes ont été isolées en condition aérobie et séquencées, représentant 73 UTOs réparties en 4 phyla (**figure 9**). Des bactéries anaérobies (sulfatoréductrices-BSR et thiosulfatoréductrices-BTR) ont aussi été recherchées. 12 UTOs ont été isolées des 4 échantillons sur le milieu pour BSR alors que 5 UTOs ont été isolées uniquement des échantillons NO et N3 sur le milieu pour BTR.

L'analyse métagénomique de la composition totale de la communauté bactérienne contenue dans les sédiments met en évidence des taxons tels que les Deinococcus-Thermus, γ -Proteobacteria, Nitrospira, Bacteroidetes et Acidobacteria, connus pour être adaptés à des environnements contaminés, notamment à l'Uranium. Cependant, seuls des Acidobacteria et les Bacteroidetes sont retrouvés préférentiellement aux points 3 et 5, dont les sédiments sont les plus chargés en uranium et en radium. L'abondance bactérienne est élevée et comprise entre 3 et $8,10^{10}$ cell.g $^{-1}$ DS (sédiment sec). Que ce soit en termes de richesse ou de diversité, aucune différence significative n'est observée entre les points.

Ces résultats mettent toutefois en évidence des différences de structure de la communauté bactérienne, en terme de composition, entre les points NO-N1 et N3-N5. Ces différences pourraient en partie s'expliquer non pas par leur composition minéralogique similaire caractéristique de terrains granitiques, mais par des teneurs en Carbone Organique Total (COT) et en Azote Total (NT) plus élevées aux points 3 et 5 et/ou par l'activité radiologique et les quantités de radioéléments (U et Po) plus fortes dans les sédiments de ces points [MALL19].

Des résultats très intéressants et novateurs sur les communautés fongiques de ces mêmes sédiments sont en cours d'analyse.

A moyen terme, nous souhaitons pouvoir transposer notre approche pluridisciplinaire (physico-chimique/biologique) sur d'autres sites miniers d'intérêt ou sources naturellement radioactives, afin de construire et d'étayer une base de données permettant d'approfondir nos connaissances sur les effets de la radioactivité sur le fonctionnement des écosystèmes.

Pour cela, un projet (COMMUNSOURCIER) a été déposé en réponse à l'appel d'offres 2020 de l'Initiative structurante EC2CO (Ecosphère Continentale et Côtière) de l'INSU – Action thématique Microbiome (Les microorganismes dans l'Environnement) pour étudier l'ensemble des communautés microbiennes et fongiques constituant des biofilms dans des sources soumises à des radiations ionisantes naturelles.

Plusieurs thèses vont aussi commencer simultanément en octobre 2019, renforçant encore les liens entre les équipes de Bordeaux, Nantes et Clermont, pour des études très complètes des microorganismes de sources minérales radioactives en Auvergne. L'une, codirigée par Claire Sergeant (CENBG) et Clarisse Mallet (LMGE) s'intéressera à la structuration et au métabolisme des communautés bactériennes et fongiques de ces milieux (bourse du ministère obtenue par Guillaume HOLUB à l'EDSC de Bordeaux). Une deuxième, codirigée par David Biron (LMGE) et Aude Beauger (GEOLAB Clermont) s'intéressera aux populations de diatomées susceptibles d'être déformées dans les milieux contaminés par la radioactivité (financée par NEEDS). Et une troisième thèse, dirigée par Vincent Breton (LPC Clermont) modélisera l'effet des doses reçues par les organismes vivants (bourse Prime80 du CNRS dans le cadre du projet structurant de la ZATU : TIRAMISU).

Notre équipe est aussi impliquée dans le projet structurant (INSPECT : Interactions, Spéciation et Effets des radionucléides d'une zone humide anthropisée) que préparent les équipes de la ZATU pour répondre à l'appel à projet NEEDS 2020, avec le soutien de l'IN2P3.

D'autre part, nous avons été sollicités deux fois par la société EDF, section Recherche et Développement de Chatou, pour des études bibliographiques sur des sujets confidentiels ayant des liens très forts avec nos thématiques de recherche (mais ne pouvant être publiés). Ainsi en 2015-2016, puis en 2019, deux contrats de recherche ont été financés par EDF, permettant l'embauche de deux personnes en CDD pendant quelques mois et l'approfondissement de nos connaissances sur ces sujets. Un projet expérimental en collaboration avec EDF sera peut-être construit ultérieurement en lien avec l'étude bibliographique de 2019.

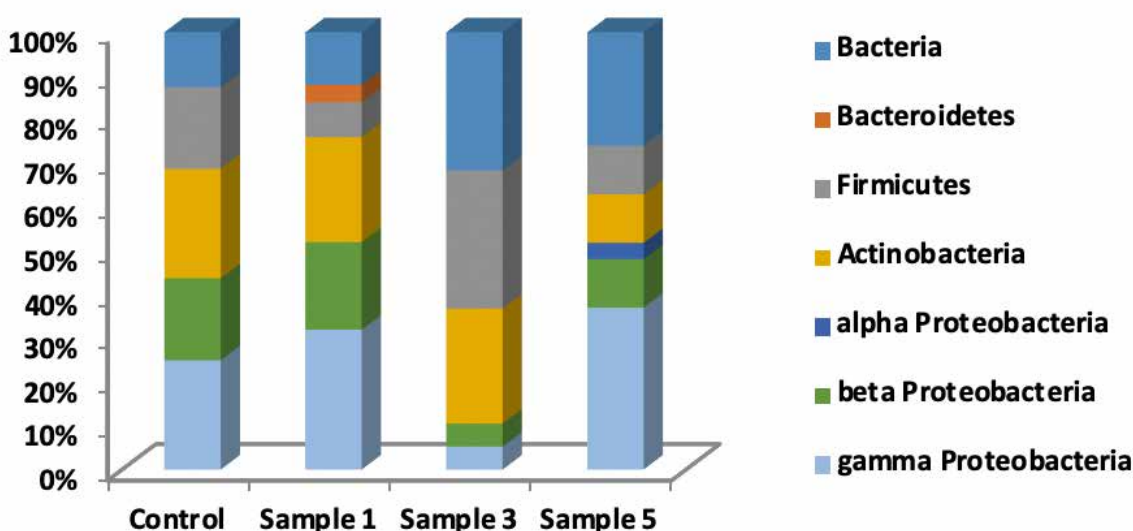


FIGURE 9 Répartition des souches bactériennes aérobie isolées, par phylum (en %)

PHYSIQUE THÉORIQUE



ABSTRACT

The Theory group has expertise in various fields of Theoretical and Nuclear Physics, exploring various mass regions of the nuclear chart and a variety of phenomena. More specifically the group focuses on models describing the structure and decay at low-energies, large-amplitude collective motions, dynamical aspects of nuclear fission. Between the nuclear scale and the fundamental level of nucleon constituents, open questions about the nature of the inter-nucleon potential in the framework of chiral effective field theory are also addressed. Particular efforts are devoted to the nuclear structure input for fundamental interactions studies and for astrophysics applications. Another topic addressed in the group is an investigation of the nature of electric charge in the framework of special relativity extended to a fifth dimension.

RÉSUMÉ

Le groupe Théorie possède une expertise dans divers domaines de la Physique théorique et de la Physique nucléaire, explorant diverses régions de masse de la carte des noyaux et une large variété de phénomènes. Les noyaux atomiques étudiés couvrent quasiment toute la carte des noyaux. Plus particulièrement le groupe se concentre sur des modèles décrivant la structure nucléaire de basse énergie à travers la carte des noyaux, les mouvements collectifs de grande amplitude et les aspects dynamiques de la fission. Entre l'échelle nucléaire et celle fondamentale des constituants élémentaires des nucléons, certaines questions ouvertes sur la nature du potentiel d'interaction entre nucléons sont abordées dans le cadre de la théorie effective des champs chirale. Des efforts particuliers sont dédiés à la contribution de la structure nucléaire aux études sur les interactions fondamentales et aux applications à l'astrophysique. Un autre domaine abordé dans le groupe est l'étude de la nature de la charge électrique dans le cadre de la relativité restreinte étendue à une cinquième dimension.

PERMANENTS

Michael BENDER
Ludovic BONNEAU
Jean-Christophe CAILLON
Nadezda SMIRNOVA

POST-DOCTORANTS

Mario SÂnchez SÂnchez

DOCTORANTS

Dao DUY DÚC
Meng HOCK KOH
Latsamy XAYAVONG

EMÉRITES ET CHERCHEURS BÉNÉVOLES

John DONOHUE
Nicolae CARJAN
Philippe QUENTIN

COLLABORATIONS

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Strasbourg - France

GANIL, Caen - France

IPN Orsay - France

IPN Lyon - France

Iowa State University - Etats Unis

University of Arizona - Etats Unis

NCSL, MSU - Etats Unis

Moscow State University - Russie

*Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy,
Sofia - Bulgarie*

Institute of Basic Sciences, Daejeon - Corée du Sud

*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences,
Lanzhou - Chine*

University of Technology of Malaysia, Johor - Malaisie

National University of Laos, Vientiane - Laos

Ecole normale supérieure d'Alger - Algérie

USTHB, Alger - Algérie

iThemba Labs - Afrique du Sud

*National Institute for Physics and Nuclear Engineering,
Bucarest - Roumanie*

Joint Institute of Nuclear Research, Dubna - Russie

University of Hue - Vietnam

INTRODUCTION

La physique théorique est une branche de la physique utilisant des abstractions et des modèles mathématiques, qui ont pour but la rationalisation, l'explication et la prédiction des phénomènes naturels. Notre groupe s'intéresse essentiellement à des questions d'auto-organisation des constituants de la matière à l'échelle des noyaux atomiques. Dans la hiérarchie d'échelle des états de la matière, cette physique dite nucléaire se situe entre la physique des particules, étudiant les constituants élémentaires de la matière et les interactions qui s'exercent entre eux, et la physique atomique et la chimie quantique, décrivant comment des noyaux atomiques et des électrons s'organisent par leur interaction électromagnétique dans les atomes et molécules.

Le noyau atomique est un système avec des propriétés très particulières. Elles sont déterminées par la nature quantique de ses constituants, les nucléons, et leurs interactions qui comprennent trois des quatre forces fondamentales du Modèle Standard de la physique des particules : l'interaction nucléaire forte (qui donne la contribution dominante à son énergie de liaison), l'interaction nucléaire faible (qui induit certaines désintégrations nucléaires), et l'interaction électromagnétique. Chaque noyau, identifié par ses nombres de protons et de neutrons, peut prendre un nombre gigantesque d'états, qui peuvent être associés à des phénomènes différents comme des excitations de nucléons individuels ou des groupes de nucléons, des excitations collectives comme des vibrations ou des rotations, ou une combinaison de ces modes. Un effet d'appariement similaire à la supraconductivité ou superfluidité de certains matériaux a comme conséquence que le comportement des noyaux avec des nombres de nucléons pair et impair est très différent. L'analyse théorique du noyau est compliquée par le fait que les nucléons (les protons et les neutrons) sont eux-mêmes des particules composites, formées de quarks, et que ces derniers sont les constituants élémentaires des théories des interactions fondamentales et non pas les nucléons. La liaison de trois quarks formant un nucléon par l'échange de gluons dans la théorie de la chromodynamique quantique (QCD, quantum chromodynamics) de l'interaction forte a des propriétés étonnantes, telles que le confinement. Ce dernier implique que les quarks ne peuvent pas être isolés parce que leur interaction augmente avec leur distance. Une conséquence frappante est que la somme des masses des quarks constitue seulement environ 2% de la masse des nucléons, les 98% restants étant l'énergie des champs qu'ils génèrent. Ceci est à contraster avec la liaison des nucléons formant un noyau, où la liaison des noyaux et des électrons formant un atome, etc, où la masse du système composite est inférieure à la somme des masses de ses constituants.

Dans ce cadre, le groupe de Physique Théorique du CENBG travaille d'une part sur la nature de l'interaction effective entre nucléons émergeant des propriétés de QCD, d'autre part sur la structure des noyaux produite par une telle interaction. L'étude de la structure nucléaire vise à décrire et comprendre les propriétés élémentaires des états de basse énergie des noyaux ainsi que leurs modes de décroissance et de désintégration à partir des degrés de liberté des nucléons. Par ailleurs l'expertise d'un des membres du groupe en théorie de la Relativité restreinte est mise en application dans une étude originale visant à élucider la nature de la charge électrique.

MODÈLES DE STRUCTURE NUCLÉAIRE

MODÈLE DE STRUCTURE DU NUCLÉON

INTERACTION NUCLÉON-NUCLÉON

PHÉNOMÈNES COLLECTIFS ET INDIVIDUELS

PROCESSUS ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET FAIBLES

RÉACTIONS D'INTÉRÊT ASTROPHYSIQUE

Depuis les années 1950, avec l'échec des théories de pions dans l'obtention d'un cadre renormalisable pour la description des forces nucléaires, la physique nucléaire avait progressé en dehors de sa connexion avec la théorie sous-jacente des interactions fortes - la QCD. Les théories effectives des champs, dont le développement a débuté au début des années 1990, offrent la possibilité d'une étude indépendante de modèle des forces multi-nucléoniques, qui est par ailleurs entièrement cohérente avec QCD (voir, par exemple, [BEDA02], [EPELO9]). Les théories effectives des champs fournissent une description systématique des observables nucléaires, qui sont exprimées comme des séries de puissances d'un petit paramètre, à savoir le quotient entre la magnitude typique de l'impulsion des nucléons et l'échelle de masse caractéristique de la théorie sous-jacente. Pour ces phénomènes nucléaires où l'impulsion est suffisamment petite (inférieure à la masse du pion, environ 140 MeV), il y a une théorie effective des champs renormalisable efficace, dénommée théorie effective des champs sans pions, pour laquelle les nucléons sont les seuls degrés de liberté explicites. Pour des impulsions plus hautes (en principe jusqu'à l'échelle de masse de QCD, vers 1 GeV), les mésons plus légers, les pions, sont inclus aussi et la théorie est construite à partir des restrictions ajoutées par la symétrie chirale (approximativement conservée) de QCD. La théorie effective des champs résultante, dite chirale, est une généralisation aux systèmes nucléaires d'une théorie de mésons, la théorie chirale des perturbations.

Aujourd'hui, la théorie effective des champs chirale est considérée comme le point de départ pour la compréhension de la structure nucléaire et les réactions nucléaires avec des méthodes *ab initio*. Parmi les méthodes les plus sophistiquées, on peut citer le modèle en couches sans cœur inerte (no-core shell model, NCSM) [BARR13], où l'équation de Schrödinger à plusieurs corps est résolue sur la

base discrète de l'oscillateur harmonique, typiquement en utilisant comme donnée les potentiels à deux ou trois corps dictés par la théorie effective des champs chirale. La version du potentiel chirale qui est la plus largement utilisée dans les calculs actuels *ab initio* est essentiellement donnée par le comptage de puissances dit de Weinberg [WEIN90]. Néanmoins, comme cela a été montré plusieurs fois dans la littérature [KAP196], [NOGG05], [VALD06], ce programme souffre de quelques incohérences avec le principe d'invariance par renormalisation, un ingrédient fondamental de toute théorie quantique des champs. D'ailleurs, la prescription de Weinberg échoue à produire une description qualitativement correcte de la diffusion nucléon-nucléon (dans le canal 1S_0 , dont le moment cinétique de spin et le moment cinétique orbital sont zéro) au premier ordre du développement effectif à cause d'un manque de répulsion de moyenne portée entre les nucléons. Les calculs NCSM semblent traduire ce problème en un excès de liaison des noyaux légers [BIND18]. Par conséquent, la convergence du développement chirale peut être améliorée par une modification cohérente du comptage de puissances initialement proposé [SANC18]. Les résultats préliminaires de cette modification que nous avons trouvées pour quelques noyaux légers sont encourageants.

Par ailleurs, nous projetons d'explorer comment incorporer à la théorie effective des champs que nous sommes en train de développer la brisure d'isospin nucléaire, qui a été un sujet d'intérêt majeur dans notre groupe au cours des dernières années (cf., par exemple, [LAM13]). Dans ce sens, il est fondamental de déterminer à quel(s) ordre(s) du développement effectif chirale les termes de mélange d'isospin du lagrangien doivent contribuer. Le comptage de puissances concernant ces termes, qui a été exploré dans [KOLC95], pourrait donc être réexaminé et adapté à notre approche.

Dans notre groupe, l'approche du modèle en couches nucléaire est développée et généralisée pour décrire un aspect particulier, lié à la brisure de la symétrie d'isospin, qui est important pour la structure des noyaux riches en protons et des noyaux autour de la ligne $N=Z$ et leurs modes de décroissance. Ces développements sont essentiels pour les études des interactions fondamentales dans les processus impliquant un noyau atomique, ainsi que pour l'estimation des taux de réactions d'intérêt astrophysique. Nous travaillons également sur la construction des interactions microscopiques pour le modèle en couches.



La symétrie d'isospin n'est qu'une symétrie approchée, mais elle est pourtant très utile en Physique Nucléaire. Depuis longtemps, elle a guidé les théoriciens dans la construction de l'interaction nucléon-nucléon et de certains modèles de la structure nucléaire. Néanmoins, la symétrie d'isospin est brisée explicitement en raison, au niveau fondamental, de la différence des masses de quarks u et des effets électromagnétiques. La brisure de symétrie d'isospin est petite à l'échelle nucléaire, mais elle doit être prise en compte dans la description des phénomènes interdits par la symétrie d'isospin, tels que certaines émissions d'un nucléon ou de systèmes de nucléons (di-proton ou particule alpha), certaines transitions bêta, les transitions E1 dans les noyaux ayant le même nombre de neutrons et de protons, etc...

Le groupe de Physique Théorique du CENBG développe un formalisme microscopique dans le cadre du modèle en couches nucléaire permettant la description de la brisure de la symétrie d'isospin dans les états nucléaires avec une très grande précision pour de nombreuses applications. Le modèle en couches traditionnel est basé sur la symétrie d'isospin et les effets de Coulomb sont d'habitude pris en compte en théorie de perturbation du premier ordre où le mélange d'isospin n'a pas lieu. Nous construisons des hamiltoniens effectifs pour le modèle en couches qui décrivent précisément les effets de la brisure de symétrie d'isospin dans un espace du modèle donné. Nous ajoutons à l'hamiltonien réaliste un terme empirique à un et deux corps qui contient la force de Coulomb et les forces d'origine nucléaire dépendantes de charge. Les paramètres des termes isovectoriel et isotensoriel sont ajustés, respectivement, aux coefficients b et c expérimentaux de l'équation des multiplets de masse isobariques (isobaric mass multiplet equation, IMME). La qualité de la description est démontrée sur la Fig. 1, où les coefficients b pour les états fondamentaux des multiplets $T=1/2$ et les coefficients c pour les multiplets $T=1$ sont présentés. L'hamiltonien pour la couche sd est proposé dans la référence [LAM13], tandis que la description des noyaux de la couche pf débute dans les travaux suivants [SMIR16, SU16, SMIR17, SMIR19a]. Les premières applications ont été dédiées à la description quantitative du phénomène d'oscillation des coefficients de l'IMME, visible sur la **figure 1** [LAM13, SMIR19a].

Une étude approfondie a été menée sur l'émission de proton et l'émission gamma retardées par l'émission bêta, qui a été observée dans les noyaux riches en protons de la couche fp . En particulier, nous avons démontré la possibilité d'obtenir le facteur spectroscopique pour l'émission de proton de l'état isobarique analogue (IAS) interdite par la symétrie d'isospin, à partir des taux d'embranchement proton et gamma expérimentaux. Dans un cas spécifique de mélange à deux états (de même J^π mais d'isospin T différent), ceci offre une nouvelle méthode pour déterminer la valeur de l'impureté en isospin dans l'IAS [SMIR16, SMIR17, SMIR19a].

De nombreuses applications de nos travaux théoriques à la structure et désintégration des noyaux riches en protons ont été réalisées en collaboration avec des groupes expérimentaux [GRAN16, SU16, XU17].

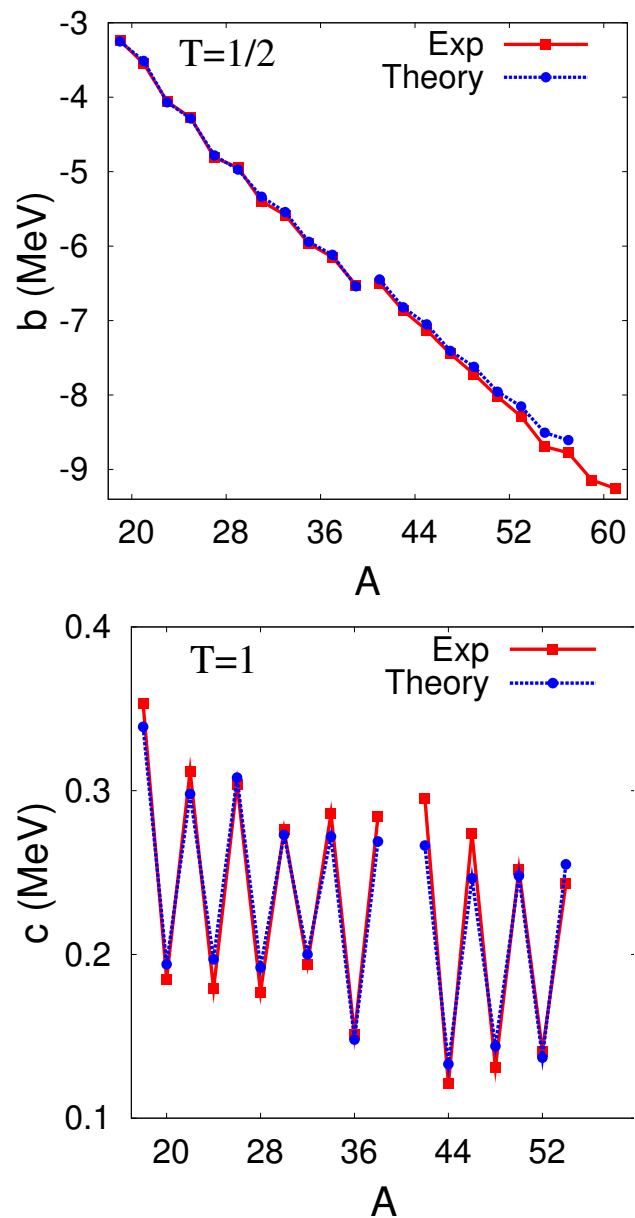


FIGURE 1

Coefficients b et c de l'IMME dans les noyaux $T=1/2$ et $T=1$ des couches sd et pf : expérience versus théorie

MODÈLE EN COUCHES AVEC DES INTERACTIONS EFFECTIVES MICROSCOPIQUES

Un grand enjeu de la théorie nucléaire est la description des propriétés des noyaux à partir des potentiels nucléon-nucléon réalistes. Cela est réalisable à l'heure actuelle pour des noyaux légers ou des noyaux de masse intermédiaire à couches fermées par les méthodes dites *ab initio*. Néanmoins, la modélisation des noyaux plus lourds à couches ouvertes se fait dans un espace tronqué du modèle (espace de valence, par exemple) et donc nécessite une interaction effective. Les interactions effectives du modèle en couches qui ont le plus de succès sont de nature phénoménologique, leurs paramètres étant déterminés à l'aide des données expérimentales.

Nous travaillons sur la construction microscopique des interactions effectives du modèle en couches à partir des calculs dans le NCSM en appliquant la transformation unitaire d'Okubo-Lee-Suzuki (OLS). Par exemple, pour déduire l'interaction effective pour la couche sd, on obtient d'abord les spectres des noyaux avec $A=16,17,18$, dans le NCSM avec des potentiels NN. Ce sont des calculs à grande échelle dans une base d'oscillateur harmonique composée jusqu'à $N_m=6$ quanta d'excitation. La transformation OLS permet de construire un hamiltonien pour l'espace du modèle beaucoup plus petit ($N_m=0$, espace de valence sd) en préservant les énergies des états du ^{18}F . Ce hamiltonien est ensuite utilisé pour les noyaux plus lourds de la couche sd. La figure 3 montre les énergies des états fondamentaux des isotopes d'oxygène par rapport à l'énergie de l'état fondamental du noyau ^{16}O , calculées dans l'espace sd en utilisant des hamiltoniens microscopiques construits à partir des potentiels N3LO, JISP16 et Daejeon16 (DJ16). On observe que les interactions réalistes surestiment l'énergie de liaison des oxygènes riches en neutron et ne positionnent pas correctement la limite d'existence des oxygènes à ^{24}O . On remarque aussi avec l'exemple de DJ16, qu'en agrandissant la base de $N_m=4$ à $N_m=6$, on diminue l'écart avec l'expérience.

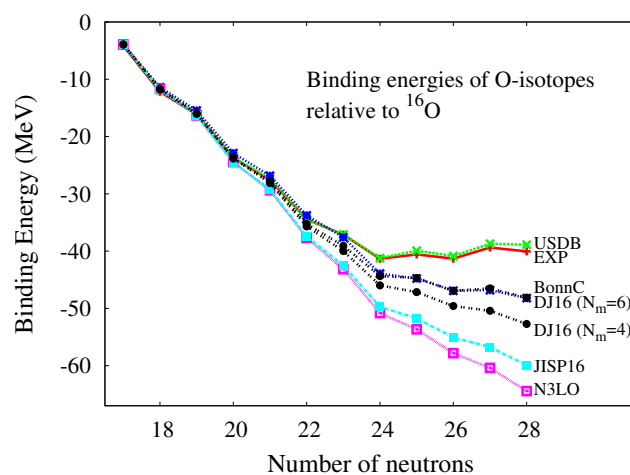


FIGURE 3

Energies de liaison des isotopes d'Oxygène relatives à celle du noyau ^{16}O expérimentales et théoriques pour différentes interactions

5

CORRECTIONS NUCLÉAIRES AUX TRANSITIONS BÊTA $0^+ \rightarrow 0^+$ ET TESTS DU MODÈLE STANDARD

L'intérêt principal de la maîtrise théorique du mélange d'isospin dans les états nucléaires est lié aux tests expérimentaux des symétries fondamentales de l'interaction électrofaible dans les processus semi-leptoniques dans les noyaux. En particulier, plusieurs efforts expérimentaux et théoriques sont dédiés aux transitions bêta super-permises $0^+ \rightarrow 0^+$ (de type Fermi). À partir du temps de vie partiel de ces transitions et de la chaleur de réaction Q , on peut déduire la valeur f_t , qui contient l'information uniquement sur l'élément de matrice nucléaire de la décroissance. En appliquant les corrections théoriques dues à la brisure de la symétrie d'isospin et aux effets radiatifs, on peut déduire la valeur F_t absolue de ces transitions et ainsi tester l'hypothèse du courant vectoriel conservé (CVC). Si cette hypothèse est validée, on peut déduire la valeur absolue de l'élément V_{ud} de la matrice de mélange des quarks de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM). L'unitarité de la matrice CKM impose des limites rigoureuses sur la physique au-delà du Modèle Standard. Actuellement, les valeurs f_t pour 14 transitions dans les noyaux de la masse $10 \leq A \leq 74$ sont connues avec une précision inférieure à 0.4% [HARD15]. Cependant, la description de la brisure de la symétrie d'isospin dans le cadre d'un modèle théorique pour ce large ensemble d'émetteurs est actuellement un défi majeur. Plusieurs approches, macroscopiques et microscopiques, développées et peaufinées récemment, divergent dans les prédictions des valeurs du mélange d'isospin ou des ordres de grandeur des corrections. Nous travaillons dans le cadre du modèle en couches sur l'évaluation théorique des corrections à l'élément de matrice de Fermi dues à la brisure de la symétrie d'isospin dans les états initial et final. Le but est de fournir un calcul de haute précision, en appliquant des contraintes expérimentales. En particulier, nous utilisons les hamiltoniens du modèle en couches qui décrivent la brisure de la symétrie d'isospin dans les états nucléaires et nous utilisons les fonctions d'onde individuelles obtenues à partir d'un potentiel réaliste (potentiel de Woods-Saxon à symétrie sphérique ou potentiel auto-cohérent du type Hartree-Fock).

Dans le cadre de la thèse de Latsamy Xayavong (Université de Bordeaux, décembre 2016), nous avons développé une méthode de calcul et réalisé une étude approfondie des corrections pour les

émetteurs des couches sd et pf [XAYA16,XAYA17,XAYA18]. Nous avons élaboré une procédure d'ajustement des fonctions d'onde qui diminue fortement la dépendance des résultats dans la paramétrisation spécifique des potentiels WS ou HF, en utilisant les contraintes sur les énergies de séparation et des rayons de charge expérimentaux. Nous avons proposé une nouvelle approche du calcul des rayons de charge. Pour les noyaux de la couche pf et plus lourds [XAYA17,SMIR19b] nous réalisons des calculs à grande échelle au-delà de l'approximation de fermeture, à confronter avec les résultats existants provenant des calculs tronqués (W.E. Ormand, B.A. Brown, 1995; I.S. Towner, J.C. Hardy, 2008, 2015). Les corrections obtenues pour un ensemble d'émetteurs de masse $10 \leq A \leq 62$ sont présentées sur la figure 2. Les nouveaux résultats vont apporter une nouvelle valeur moyenne de F_t et vont contribuer aux vérifications des symétries fondamentales du Modèle Standard.

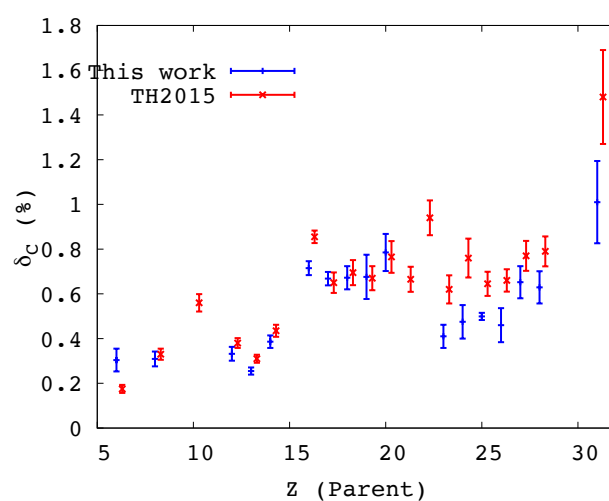


FIGURE 2

La correction aux transitions de Fermi due à la brisure de la symétrie d'isospin (δ_C) calculée par notre groupe en comparaison avec les résultats de Towner et Hardy [HARD15].

STRUCTURE DES NOYAUX IMPAIRS DANS L'APPROCHE DE CHAMP MOYEN PLUS CORRÉLATIONS D'APPARIEMENT

L'étude des moments magnétiques dans l'état fondamental de noyaux impairs bien déformés menée à partir de 2009, reposant sur la brisure de renversement du temps par le champ moyen, a été étendue à des fonctionnelles de Skyrme incluant des termes souvent omis dans les paramétrisations populaires par le passé. Ces dernières conservent leur succès dans les propriétés globales du noyau, mais diffèrent des paramétrisations les plus récentes en ce qui concerne le facteur de réduction du rapport gyromagnétique de spin. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication en 2015 [BONN15].

Par ailleurs nous avons étendu l'étude des noyaux impairs bien déformés à leurs états excités formant des bandes de rotation. Puisque, par essence, nos calculs de champ moyen auto-cohérent avec appariement décrivent des états intrinsèques du noyau, il faut traduire les résultats obtenus en information spectroscopique caractérisant des observables dans le référentiel du laboratoire. Pour cela nous avons incorporé nos fonctions d'onde intrinsèques dans le modèle unifié de Bohr et Mottelson. Cela permet de restaurer de façon approchée la symétrie de rotation brisée par le champ moyen en construisant des états de bon moment angulaire. Nous avons un assez bon accord pour les énergies d'excitation de têtes de bande dans des noyaux impairs en neutron, mais un écart assez important pour les noyaux impairs en protons [KOH16]. Il est probable que cette différence soit attribuée au traitement approché de la contribution coulombienne d'échange, à savoir l'approximation de Slater très couramment utilisée dans les approches de champ moyen auto-cohérent.

De plus nous avons effectué des calculs de barrière de fission dans les actinides impairs à moment angulaire projeté sur l'axe de fission K et parité π fixes pour la première barrière et jusqu'au second minimum (correspondant à l'isomère de fission). Nous avons mis en évidence une sensibilité notable de la hauteur de barrière aux valeurs de K et π , au traitement des corrélations d'appariement et aux termes impairs généralement omis de la fonctionnelle de Skyrme [KOH17].

Malgré le succès de ces travaux le caractère phénoménologique de l'interaction résiduelle utilisée pour la description des corrélations d'appariement requiert un ajustement de ses paramètres sur des données expérimentales censées être sensibles à ce phénomène (en principe exclusivement). Historiquement l'observable la plus couramment considérée pour cela est la différence d'énergie de liaison entre un noyau impair et la moyenne de ses deux voisins pair-pairs. Toutefois on sait depuis les travaux pionniers de Bohr, Mottelson et Pines sur le phénomène d'appariement dans les noyaux à la fin des années 1950 que le moment d'inertie extrait des états de basse énergie d'une bande de rotation est très sensible au phénomènes d'appariement. Cependant cette quantité n'a jusqu'alors jamais été utilisée pour l'ajustement de l'intensité des interactions résiduelles utilisées pour la description de l'appariement. Pour asseoir la validité de l'idée de Bohr et collaborateurs selon laquelle les propriétés d'appariement peuvent être évaluées aussi bien par la reproduction des différences d'énergie de liaison pair-impair que par la reproduction des moments d'inertie, nous avons, pour chacune de ces quantités, effectué un ajustement des paramètres d'intensité neutrons et protons sur des données expérimentales dans des noyaux rigidement déformés de la région des terres rares. Nous avons obtenu un excellent accord entre les résultats de ces deux approches indépendantes [NOR19].

A l'aide de ces intensités d'interaction d'appariement nous avons très récemment appliqué notre approche microscopique brisant le renversement du temps à des états isomériques à 2 quasiparticules dans des noyaux pair-pairs de la région des terres rares ($A \sim 150-160$) et des actinides ($A \sim 236$). Nous avons obtenu un assez bon accord pour l'énergie d'excitation d'isomères- K (projection du moment angulaire sur l'axe de symétrie du noyau) avec les données expérimentales. De plus nous avons commencé à explorer le degré de liberté octupolaire en brisant, en outre, la symétrie de parité et trouvé une déformation octupolaire non nulle dans l'isomère 6^- du noyau ^{234}U [BONN19].

APPROXIMATION DE HARTREE-FOCK POUR LES NOYAUX DÉFORMÉS AVEC UN POTENTIEL GÉNÉRAL À 2-CORPS ET CORRÉLATIONS D'APPARIEMENT AVEC UNE INTERACTION RÉSIDUELLE COHÉRENTE

Jusqu'au début des années 2000, les approches reposant sur le concept de champ moyen, et ses extensions pour inclure certaines corrélations, ont fait un large usage d'interactions effectives phénoménologiques à 2 corps avec dépendance en densité, complétées d'interactions résiduelles schématisées pour la description des corrélations d'appariement. La dépendance en densité est un moyen de tenir compte des effets de milieu de façon plus simple que par une interaction explicite à 3 corps ou plus (indépendante de la densité) et s'est montrée très efficace dans la reproduction, au niveau Hartree-Fock plus corrélations d'appariement, des propriétés globales des noyaux rigides sphériques ou déformés (énergie de liaison, rayons, déformation, barrières de fission). Toutefois

des calculs rigoureux au-delà du champ moyen de type mélange de configuration (par la méthode de la coordonnée génératrice, GCM) et restauration de symétries (brisées par le champ moyen) ont révélé dans le milieu des années 2000 une difficulté fondamentale dans l'usage d'interactions dépendant de la densité. Malgré l'existence de régularisations possibles dans certains cas, il est devenu nécessaire de considérer des interactions indépendantes de la densité afin de pouvoir utiliser les approches ci-dessus au-delà du champ moyen. Jusqu'à présent les interactions phénoménologiques à 2+3 corps adaptées aux approches de type GCM + restauration de symétries se sont révélées soit insuffisantes, soit trop difficiles à mettre en œuvre numériquement.

Dans le même temps, des progrès significatifs de la théorie de perturbation chirale ont été accomplis depuis le début des années 2000 dans la construction d'une interaction effective à 2 corps qui permet non seulement de reproduire les données de diffusion de nucléons ainsi que l'état lié à 2 nucléons (le deutéron), mais aussi de ne conduire à aucune divergence dans les calculs de structure des noyaux grâce à une procédure de renormalisation. Très récemment une étude systématique du développement perturbatif chirale dans les noyaux à couches fermées a montré que la série de perturbation à N corps au-delà d'une solution de Hartree-Fock non seulement convergeait raisonnablement dès l'ordre 3 pour une interaction effective chirale à 2 et 3 corps renormalisée par transformation de similarité, mais que l'accord avec les données expérimentales pour l'énergie de liaison était encourageant [TICH16].

Dans ce contexte nous avons mis au point un code de champ moyen + corrélations d'appariement à l'approximation HTDA (Highly-truncated diagonalization approach, développée dans le groupe Théorie du CENBG ces 20 dernières années) reposant sur une même interaction, non empirique, de forme générale avec renormalisation par transformation de similarité. C'est dans ce cadre que se déroule la thèse de Dao Duy Duc (2016-2019, sous la direction de L. Bonneau). Un des premiers objectifs de ce travail a été la détermination d'une base d'états individuels adéquate, à savoir une base d'ondes planes confinées dans une boîte cubique, ainsi que la convergence de la solution Hartree-Fock vis-à-vis de ses paramètres (taille de la boîte et coupure en impulsion individuelle). Les résultats de calculs Hartree-Fock dans des noyaux déformés ont montré la capacité de diverses interactions non empiriques à reproduire la déformation des états fondamentaux [DAO19]. De plus les premiers résultats de calculs d'appariement à l'approximation HTDA utilisant l'interaction résiduelle associée à l'interaction nucléon-nucléon produisant le champ moyen sont comparables à ceux obtenus avec des interactions phénoménologiques ajustées sur des données sensibles. De plus nous avons observé une convergence des résultats avec la taille de la base des configurations appariées mélangées par HTDA.

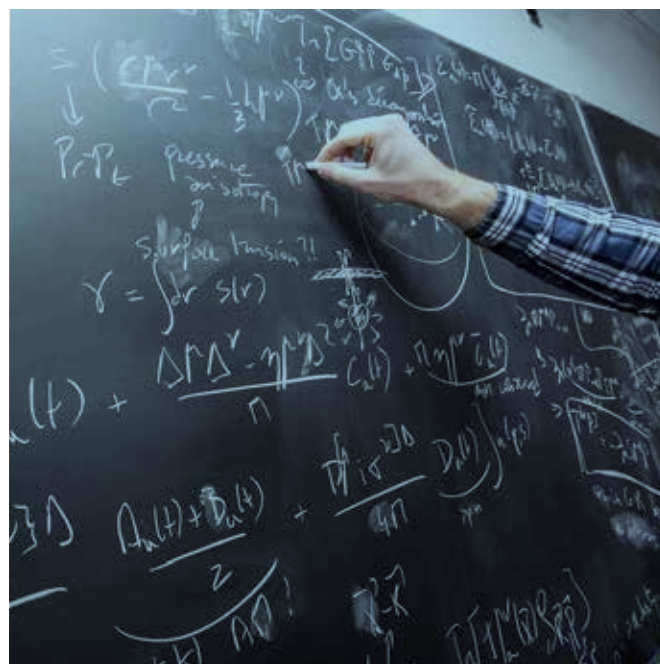
8

ETUDE DU DEGRÉ DE LIBERTÉ DE DÉFORMATION TRIAXIALE DANS LES NOYAUX LOURDS

L'étude des excitations collectives quadrupolaires utilisant un Hamiltonien à la Bohr déterminé microscopiquement, largement entreprise auparavant dans la région des terres rares, a été étendue à la région des actinides en corrélation avec la description de la première barrière de fission. La reproduction des données dans ces deux domaines dépend crucialement d'une bonne description des corrélations d'appariement. Elle est effectuée à l'approximation BCS et dans certains cas dans le cadre de l'approche dite HTDA qui corrige le défaut majeur de l'approximation de BCS pour des systèmes fermioniques finis (non-conservation du nombre de particules).

Deux résultats ayant donné lieu à publication ont été obtenus.

La reproduction des hauteurs de la première barrière de fission de noyaux dans la région des actinides dépend entre autres d'une bonne description du couplage entre les degrés de liberté axiaux et triaxiaux de la déformation nucléaire. Ceci nous a conduit à étudier pour quatre noyaux pair-pairs dans cette région (^{236}U , ^{240}Pu , ^{248}Cm et ^{252}Cf) les spectres d'excitation collective dans le puits fondamental. La bonne reproduction qualitative de ces propriétés, fondée sur une approximation BCS, a été reliée à la bonne



évaluation par nos calculs de la hauteur de la première barrière (à 300 keV près pour les deux noyaux les plus légers et à un 1 MeV près pour les deux autres) Cette recherche constitue le travail de thèse de Karima Benrabia et a été publiée dans Physical Review C [BENR17].

Nous avons déterminé l'intensité d'une interaction résiduelle $|T_z| = 1$ de portée nulle à utiliser dans un formalisme HTDA en fittant les moments d'inertie du premier état 2^+ d'une dizaine de noyaux à déformation grande et rigide, de la région des terres rares. Ces moments ont été calculés à la limite adiabatique (à la Inglis-Belyaev avec correction approchée de Thouless-Valatin). Ils ont été comparés aux résultats de calculs de dynamique quadrupolaire avec un Hamiltonien de Bohr déterminé à partir de solutions HTDA utilisant l'interaction résiduelle ainsi fittée. Nous avons pu ainsi valider cette approche a posteriori en démontrant que les états 2^+ considérés correspondaient à des états purement rotationnels (très faibles fluctuations quantiques de forme autour de la déformation d'équilibre classique). Cette recherche qui constitue le travail de thèse que soutiendra très prochainement Mohamed Rebhaoui a été publiée dans Journal of Physics G (London) [REBH18].

Enfin, nous avons récemment estimé la validité d'approximations courantes pour déterminer les paramètres de masse adiabatiques (masses $M(Q)$ à la Inglis-Belyaev) avec une version plus self-consistante (masses $M(P)$ avec une notation usuelle). Les premiers résultats de spectroscopie collective quadrupolaire sont très encourageants en ce qu'ils améliorent la qualité de ce qui avait été obtenu précédemment.

ETUDE DE L'EFFET DES CORRÉLATIONS D'APPARIEMENT SUR LES PROPRIÉTÉS DE ROTATION GLOBALE EN TERMES DE COUPLAGE AVEC DES COURANTS VORTICAUX INTRINSÈQUES

Une description de la variation des moments d'inertie dans une bande de rotation de noyaux pair-pair bien déformés due à l'effet anti-pairing de Coriolis est effectuée en termes de couplage à la Chandrasekhar (ellipsoïdes S) des courants de rotation globale avec des courants vorticaux intrinsèques. On en déduit une expression analytique (polynomiale d'ordre 6 pour la variable vitesse angulaire de rotation globale) à la Harris. Les coefficients de ces polynômes ne résultent pas d'un fit pour chaque noyau mais sont définis à partir de trois données expérimentales au fondamental ou liées au premier état excité (différences d'énergie pair impair au

voisinage du noyau considéré, B(E2) de la transition $2+ \rightarrow 0+$, énergie du premier état $2+$). Cette étude a conduit dans la région des terres rares et surtout des actinides à une très bonne reproduction des énergies (à quelques dizaines de keV près jusqu'à des spins de l'ordre de 20 \hbar ou plus) des états d'une bande de rotation jusqu'à ce que d'autres effets (comme l'alignement de deux nucléons d'une paire brisée ou une variation coulombienne forte de la déformation) n'entrent pas en jeu. Une version très préliminaire de ce travail a déjà donné lieu à une publication ^[QUEN17]. Un article est soumis pour publication très prochainement.

UNE POSSIBLE UNIFICATION DES FORCES GRAVITATIONNELLE DE NEWTON ET ÉLECTROSTATIQUE DE COULOMB

Il est bien connu que la force de gravitation de Newton et celle d'électrostatique de Coulomb ont des propriétés similaires comme par exemple une loi en $1/r^2$, une portée infinie et l'existence d'un théorème de Gauss. Cependant, ces similarités masquent de profondes différences notamment sur l'intensité des forces ainsi que sur la nature de leurs sources : masse et charge électrique. Alors que le mécanisme de Higgs contribue à une meilleure compréhension de l'origine de la masse des particules élémentaires, la nature de la charge électrique est, quant à elle, totalement inconnue. Personne ne sait pourquoi sa valeur élémentaire est la même pour un lepton chargé sans structure et pour un proton qui est un "objet" infiniment plus complexe. D'un autre côté, on sait que la charge électrique est conservée dans toutes les réactions comme c'est le cas également de l'énergie et de l'impulsion. Mais alors que la conservation de l'énergie et de l'impulsion est associée aux quatre dimensions d'espace-temps (invariance par translation dans l'espace-temps), ce n'est actuellement pas le cas pour la conservation de la charge électrique. Pourtant, dans le théorème CPT, les trois dimensions spatiales (relées à P), la dimension temporelle (relée à T) et la charge électrique (relée à C) semblent être sur un pied d'égalité. Puisque la nature de la charge électrique est inconnue, on peut se demander si elle ne pourrait pas être reliée elle aussi à une dimension et plus particulièrement à une extra-dimension.

Dans ce contexte l'un des membres du groupe Théorie du CENBG s'est intéressé à la possibilité que les particules élémentaires chargées puissent se propager dans l'espace-temps à cinq dimensions avec une cinquième dimension compacte ^[CAIL18]. Plus précisément, il a considéré la charge électrique comme la quatrième composante de l'impulsion dans le cadre de la relativité restreinte à cinq dimensions. Ainsi, les deux signes possibles de la charge électrique et sa conservation peuvent être simplement expliqués. L'intérêt de cette hypothèse est de pouvoir prendre en compte masse et charge à travers une même quantité physique (le penta-vecteur énergie-impulsion) dans l'objectif de montrer un possible lien entre les forces classiques en $1/r^2$ discutées précédemment (à travers un formalisme commun pour leurs sources). Puisque la cinquième dimension n'est pas observée elle a été compactifiée sur un cercle avec un rayon extrêmement petit déterminé à partir des constantes physiques fondamentales (en utilisant uniquement les unités de Planck). Le formalisme développé peut être vu comme une version

classique (dans le sens où l'on n'est pas en relativité générale) de la théorie originale de Kaluza-Klein, ce qui fait que plusieurs résultats obtenus sont déjà bien connus (comme par exemple l'explication de l'origine de la constante de structure fine). Il est bien connu également que le mouvement d'une particule élémentaire dans l'espace à cinq dimensions nous apparaîtrait comme une particule se déplaçant dans l'espace à quatre dimensions avec une masse modifiée prenant en compte la quatrième composante de l'impulsion inobservée. D'un autre côté, en se plaçant dans le cadre de la relativité restreinte à cinq dimensions avec l'hypothèse de départ sur la charge électrique, on obtient une relation très particulière pour le module de la vitesse d'une particule élémentaire dans l'espace à cinq dimensions. Ce module a une valeur très proche de celle de la vitesse de la lumière dans le vide (en étant toujours inférieure à c) et ce, quelle que soit la vitesse de la particule considérée dans notre espace à quatre dimensions. Le phénomène de dilatation des temps trouve également une explication simple dans ce cadre, le mouvement de la particule dans la dimension supplémentaire semblant agir comme une horloge interne pour la particule. Enfin, le résultat le plus important de cette étude est le fait que la force de Coulomb émerge alors de la force gravitationnelle à cinq dimensions ce qui permet d'unifier la force gravitationnelle de Newton et celle électrostatique de Coulomb.

Les problèmes des modes de Fourier et du rapport charge/masse bien connus dans la théorie de Kaluza-Klein ont également été discutés. Par exemple, la propagation de particules élémentaires hors-couche de masse dans l'espace-temps à cinq dimensions pourrait être interprétée comme le mouvement de particules avec les masses appropriées dans notre espace à quatre dimensions. Les modes de Fourier (autres que ceux décrivant les particules élémentaires) seraient alors associés avec des particules de très petites longueurs d'onde (donc de très grandes énergies), expliquant pourquoi cette cinquième dimension est effectivement cachée dans notre monde quadridimensionnel de faible énergie. Enfin, les équations cinématiques à cinq dimensions associées au processus d'annihilation électron-positron en deux photons ont été considérées afin de vérifier que la réduction à quatre dimensions donne bien les résultats attendus.

D'une part nous avons calculé les distributions en masse et d'énergie cinétique de fragments de fission dans le cadre d'un modèle de pré-scission où les formes des noyaux sont décrites par des ovales de Cassini. L'objectif est d'offrir des prédictions fiables pour les propriétés des fragments de fission dans la région des noyaux superlourds. Pour cela nous avons auparavant testé notre modèle de pré-scission sur les noyaux les plus lourds pour lesquels ces propriétés ont été mesurées avec une bonne statistique : les transactinides, entre Fm ($Z=100$) et Sg ($Z=106$). Un accord satisfaisant a été obtenu [CARI15, CARI17a]. Encouragés par ce résultat, nous avons étudié la région peu explorée des noyaux superlourds. Nous avons mis en évidence le rôle décisif de la déformation octupolaire. Seule l'inclusion d'un terme octupolaire mène à une division asymétrique avec la masse la plus probable du fragment léger autour de 136 [CARI17b], comme dans le cas du fragment lourd pour la fission des actinides dans la région U – Cf. Plus récemment nous avons également étudié la dépendance vis-à-vis de l'énergie d'excitation de la distribution en masse des fragments [CARI19]. A présent nous étudions deux autres modes possible de fission des noyaux superlourds : 1) la fission ternaire et 2) l'émission des clusters avec le noyau final ^{208}Pb .

D'autre part nous avons étudié, sur l'exemple du noyau fissionnant ^{236}U , l'effet du nombre fini de neutrons sur la distribution d'énergie cinétique des neutrons de scission dans le cadre d'un modèle dy-

namique de scission [RIZE13]. Pour ce faire l'équation de Schrödinger à deux dimensions dépendant du temps est utilisée pour propager chaque fonction d'onde de neutron durant le processus de scission qui est supposé durer 10^{-22} s. A la fin nous séparons les parties non liées et continuons à les propager aussi longtemps que possible (dans ce cas, jusque 50×10^{-22} s) dans l'approximation des fragments gelés. A plusieurs instants les transformées de Fourier de ces paquets d'onde sont calculés afin d'obtenir les distributions en impulsion correspondantes, qui conduisent aux distributions d'énergie cinétique. L'évolution temporelle de ces distributions aide à comprendre comment un neutron se sépare du système fissionnant et donne asymptotiquement le spectre d'énergie cinétique de ce neutron. Nous regroupons les résultats en sous-états de projection du moment angulaire sur l'axe de fission, Ω , pour étudier son influence sur le spectre. Finalement la somme sur toutes les valeurs de Ω est comparée avec un spectre d'évaporation typique et avec des mesures de précision récentes dans la réaction $^{235}\text{U}(n, f)$. Des structures sont présentes à la fois dans le spectre des neutrons de scission et dans les données. A partir de l'analyse de la partie haute énergie du spectre on peut déduire qu la moitié des neutrons de fission prompts sont émis à la scission.

- [BARR13] B.R. Barrett et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 69, 131 (2013)
- [BARR17] B.R. Barrett et al., JPS Conf. Proceed. 14, 021006 (2017)
- [BEDA02] P. F. Bedaque et al., Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 52, 339 (2002)
- [BENR17] K. Benraba et al., Phys. Rev. C 96, 034320 (2017)
- [BIND18] S. Binder et al., Phys. Rev. C 98, 014002 (2018)
- [BLAN15] B. Blank et al., Eur. Phys. J. A 51, 8 (2015)
- [BONN15] L. Bonneau et al., Phys. Rev. C 91, 054307 (2015)
- [BONN19] L. Bonneau, SDANCA19, à soumettre à Bulg. J. Phys.
- [CAIL18] J.-C. Caillon, Phys. Lett. A382, 3307 (2018)
- [CARI15] N. Carjan et al., Nucl. Phys. A 942, 97 (2015)
- [CARI17a] N. Carjan et al., J. Phys.: Conf. Ser. 863, 012044 (2017)
- [CARI17b] N. Carjan et al., Nucl. Phys. A 968, 453 (2017)
- [CARI19a] N. Carjan et al., Phys. Rev. C 99, 064606 (2019)
- [CARI19b] N. Carjan et al., Phys. Rev. C 99, 034613 (2019)
- [DAO19] Dao Duy Duc et al., XXVIII Nuclear Physics Workshop, à soumettre à Acta Physica Polonica - Proceedings Supplement
- [EPEL09] E. Epelbaum et al., Rev. Mod. Phys. 81, 1773 (2009)
- [GRAN16] F. De Grancey et al., Phys. Lett. B 758, 26 (2016)
- [HARD15] J.C. Hardy et al., Phys. Rev. C 91, 025501 (2015)
- [KAPL96] D.B. Kaplan et al., Nucl. Phys. B 478, 629 (1996)
- [KOH16] M. H. Koh et al., Eur. Phys. J. A 52, 3 (2016)
- [KOH17] M. H. Koh et al., Phys. Rev. C 95, 014315 (2017)
- [KOL95] U. van Kolck, Few-Body Syst. Suppl. 9, 444 (1995)
- [LAM13] Y.H. Lam et al., Phys. Rev. C 87, 054304 (2013)
- [MAGR17] C. Magron et al., Eur. Phys. J. A 53, 77 (2017)
- [NOGG05] A. Nogga et al., Phys. Rev. C 72, 054006 (2005)
- [NOR19] N. M. Nor et al., Phys. Rev. C 99, 064306 (2019)
- [OKOL16] J. Okolowicz et al., Phys. Lett. B 757, 303 (2016)
- [QUEN17] P. Quentin et al., Bulg. J. Phys. 44, 326 (2017)
- [REBH18] M. Rebhaoui et al., J. Phys. G 45, 115102 (2018)
- [RIZE13] M. Rizea et al., Nucl. Phys. A 909, 50 (2013)
- [SANC18] M. Sánchez et al., Phys. Rev. C 97, 024001 (2018)
- [SMIR16] N.A. Smirnova et al., Phys. Rev. C 93, 044305 (2016)
- [SMIR17] N.A. Smirnova et al., Phys. Rev. C 95, 054301 (2017)
- [SMIR19a] N.A. Smirnova, Nuovo Cimento 42C, 54 (2019)
- [SMIR19b] N.A. Smirnova et al., Proc. Int. Conf. "Nuclear Theory in the Supercomputing Era – 2018" (NTSE-2018), Daejeon, South Korea, Oct. 29 – Nov. 2, 2018
- [SMIR19c] N. A. Smirnova et al., Phys. Rev. C 100, 054329 (2019)
- [SU16] J. Su et al., Phys. Lett. B 756, 323 (2016)
- [TICH16] A. Tichai et al., Phys. Lett. B 756, 283 (2016)
- [VALD06] M. Pavao Valderrama et al., Phys. Rev. C 74, 054001 (2006)
- [WEIN90] S. Weinberg, Phys. Lett. B 251, 288 (1990); Nucl. Phys. B 363, 3 (1991)
- [XAYA17] L. Xayavong et al., Acta Phys. Pol. B Supp 10, 285 (2017)
- [XAYA18] L. Xayavong, N.A. Smirnova, Phys. Rev. C 97, 024324 (2018)
- [XU16] X. X. Xu et al., Phys. Lett. B 766, 312 (2016)

PUBLICATIONS DANS DES REVUES AVEC COMITÉS DE LECTURE

- A. A. Abdo et al., "Gamma-Ray Flaring Activity from the Gravitationally Lensed Blazar PKS 1830-211 Observed by Fermi LAT", *Astrophys. J.* 799, 143 (2015)
- A. Abramowski et al., "The high-energy γ -ray emission of AP Librae", *Astron. Astrophys.* 573, A31 (2015)
- A. Abramowski et al., "Probing the gamma-ray emission from HESS J1834-087 using H.E.S.S. and Fermi LAT observations", *Astron. Astrophys.* 574, A27 (2015)
- A. Abramowski et al., "H.E.S.S. detection of TeV emission from the interaction region between the supernova remnant G349.7+0.2 and a molecular cloud", *Astron. Astrophys.* 574, A100 (2015)
- A. Abramowski et al., "H.E.S.S. reveals a lack of TeV emission from the supernova remnant Puppis A", *Astron. Astrophys.* 575, A81 (2015)
- A. Abramowski et al., "Discovery of variable VHE γ -ray emission from the binary system 1FGL J1018.6-5856", *Astron. Astrophys.* 577, A131 (2015)
- A. Abramowski et al., "Discovery of the VHE gamma-ray source HESS J1832-093 in the vicinity of SNR G22.7-0.2", *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 446, 1163 (2015)
- A. Abramowski et al., "The 2012 flare of PG 1553+113 seen with H.E.S.S. and Fermi-LAT", *Astrophys. J.* 802, 65 (2015)
- A. Abramowski et al., "The exceptionally powerful TeV gamma-ray emitters in the Large Magellanic Cloud", *Science* 347, 406 (2015)
- A. Abramowski et al., "Constraints on an Annihilation Signal from a Core of Constant Dark Matter Density around the Milky Way Center with H.E.S.S.", *Phys. Rev. Lett.* 114, 081301 (2015)
- F. Acero et al., "Study of TeV shell supernova remnants at gamma-ray energies", *Astron. Astrophys.* 580, A74 (2015)
- F. Acero et al., "Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog", *Astrophys. J. Suppl. S.* 218, 23 (2015)
- M. Ackermann et al., "The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 MeV and 820 GeV", *Astrophys. J.* 799, 86 (2015)
- M. Ackermann et al., "The Third Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope", *Astrophys. J.* 810, 14 (2015)
- M. Ackermann et al., "Multiwavelength Evidence for Quasi-periodic Modulation in the Gamma-ray Blazar PG 1553+113", *Astrophys. J.* 813, L41 (2015)
- M. Ackermann et al., "Limits on Dark Matter Annihilation Signals from the Fermi LAT 4-year Measurement of the Isotropic Gamma-Ray Background", *J. Cosmol. Astropart. P.* 1509, 008 (2015)
- M. Ackermann et al., "Updated search for spectral lines from Galactic dark matter interactions with pass 8 data from the Fermi Large Area Telescope", *Phys. Rev. D* 91, 122002 (2015)
- M. Ackermann et al., "An extremely bright gamma-ray pulsar in the Large Magellanic Cloud", *Science* 350, 801 (2015)
- I. Ambrožová et al., "Microdosimetry for a carbon ion beam using track-etched detectors", *Radiat. Prot. Dosim.* 166, 247 (2015)
- R. Arnold et al., "Result of the search for neutrinoless double- β decay in ^{100}Mo with the NEMO-3 experiment", *Phys. Rev. D* 92, 072011 (2015)
- D. Atanasov et al., "Precision Mass Measurements of $^{129-131}\text{Cd}$ and Their Impact on Stellar Nucleosynthesis via the Rapid Neutron Capture Process", *Phys. Rev. Lett.* 115, 232501 (2015)
- Y. Ayyad et al., "Dissipative effects in spallation-induced fission of ^{208}Pb at high excitation energies", *Phys. Rev. C* 91, 034601 (2015)
- P. Barberet and H. Seznec, "Advances in microbeam technologies and applications to radiation biology", *Radiat. Prot. Dosim.* 166, 182 (2015)
- M. A. Bernal et al., "Track structure modeling in liquid water: A review of the Geant4-DNA very low energy extension of the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit", *Phys. Medica* 31, 861 (2015)
- M. Šefl et al., "Calculation of cellular S-values using Geant4-DNA: The effect of cell geometry", *Appl. Radiat. Isot.* 104, 113 (2015)
- M. A. Bernal et al., "The Influence of DNA Configuration on the Direct Strand Break Yield", *Comput. Math. Methods Med.* 2015, 417501 (2015)
- B. Blank et al., "High-precision efficiency calibration of a high-purity co-axial germanium detector", *Nucl. Instrum. Meth. A* 776, 34 (2015)
- B. Blank et al., "Half-life and branching ratios for the beta decay of ^{38}Ca ", *Eur. Phys. J. A* 51, 8 (2015)
- L. Bonneau et al., "Effect of core polarization on magnetic dipole moments in deformed odd-mass nuclei", *Phys. Rev. C* 91, 054307 (2015)
- K. P. Brabcová et al., "Contribution of indirect effects to clustered damage in DNA irradiated with protons", *Radiat. Prot. Dosim.* 166, 44 (2015)
- H. L. Byrne et al., "The cytoplasm as a radiation target: an in silico study of microbeam cell irradiation", *Phys. Med. Biol.* 60, 2325 (2015)
- M. Caamaño et al., "Characterization of the scission point from fission-fragment velocities", *Phys. Rev. C* 92, 034606 (2015)
- L. Caceres et al., "Nuclear structure studies of ^{24}F ", *Phys. Rev. C* 92, 014327 (2015)
- N. Carjan et al., "Fission of transactinide elements described in terms of generalized Cassinian ovals: Fragment mass and total kinetic energy distributions", *Nucl. Phys. A* 942, 97 (2015)
- N. Carjan and M. Rizea, "Similarities between calculated scission-neutron properties and experimental data on prompt fission neutrons", *Phys. Lett. B* 747, 178 (2015)
- M. Comet et al., "Nuclear excitation by electron transition rate confidence interval in a ^{201}Hg local thermodynamic equilibrium plasma", *Phys. Rev. C* 92, 054609 (2015)
- E. Delage et al., "PDB4DNA: Implementation of DNA geometry from the Protein Data Bank (PDB) description for Geant4-DNA Monte-Carlo simulations", *Comput. Phys. Commun.* 192, 282 (2015)
- C. D. Dermer et al., "Near-equipartition Jets with Log-parabola Electron Energy Distribution and the Blazar Spectral-index Diagrams", *Astrophys. J.* 809, 174 (2015)
- J. Dobaczewski et al., "Properties of nuclei in the nobelium region studied within the covariant, Skyrme, and Gogny energy density functionals", *Nucl. Phys. A* 944, 388 (2015)
- D. Drung et al., "Validation of the ultrastable low-noise current amplifier as travelling standard for small direct currents", *Metrologia* 52, 756 (2015)
- F. Farget et al., "Transfer-induced fission in inverse kinematics: Impact on experimental and evaluated nuclear data bases", *Eur. Phys. J. A* 51, 175 (2015)
- L. P. Gaffney et al., "Collectivity in the light radon nuclei measured directly via Coulomb excitation", *Phys. Rev. C* 91, 064313 (2015)
- S. Gil et al., "Analysis of platinum and trace metals in treated glioma rat cells by X-ray fluorescence emission.", *Biol. Trace Elem. Res.* 163, 177 (2015)
- M. Guttormsen et al., "Experimental level densities of atomic nuclei", *Eur. Phys. J. A* 51, 170 (2015)
- T. Hovatta et al., "A combined radio and GeV γ -ray view of the 2012 and 2013 flares of Mrk 421", *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 448, 3121 (2015)
- P. Hubert, M. S. Pravikoff, and J. Gaye, "Possibility of wine dating using the natural Pb-210 radioactive isotope", *J. Environ. Radioact.* 142, 132 (2015)

- S. Incerti et al., "Comparison of experimental proton-induced fluorescence spectra for a selection of thin high-Z samples with Geant4 Monte Carlo simulations", Nucl. Instrum. Meth. B 358, 210 (2015)
- B. Jurado and K.-H. Schmidt, "Influence of complete energy sorting on the characteristics of the odd-even effect in fission-fragment element distributions", J. Phys. G-Nucl. Partic. 42, 055101 (2015)
- G. Keefer et al., "Laboratory studies on the removal of radon-born lead from KamLAND's organic liquid scintillator", Nucl. Instrum. Meth. A 769, 79 (2015)
- G. Kessedjian et al., "Fission probabilities of ^{242}Am , ^{243}Cm , and ^{244}Cm induced by transfer reactions", Phys. Rev. C 91, 044607 (2015)
- N. Kesteloot et al., "Deformation and mixing of coexisting shapes in neutron-deficient polonium isotopes", Phys. Rev. C 92, 054301 (2015)
- I. Kyriakou, S. Incerti, and Z. Francis, "Technical Note: Improvements in geant4 energy-loss model and the effect on low-energy electron transport in liquid water", Phys. Medica 42, 3870 (2015)
- A. T. Laffoley et al., "High-precision half-life measurements for the superallowed Fermi β^+ emitter ^{18}Ne ", Phys. Rev. C 92, 025502 (2015)
- A. Lepailleur et al., "Spectroscopy of ^{28}Na : Shell evolution toward the drip line", Phys. Rev. C 92, 054309 (2015)
- C. Marquet et al., "High energy resolution electron beam spectrometer in the MeV range", J. Instrum. 10, P09008 (2015)
- J.-F. Martin et al., "Studies on fission with ALADIN", Eur. Phys. J. A 51, 174 (2015)
- L. Martin, N. Mercier, and S. Incerti, "DosiVox: a Geant 4-based software for dosimetry simulations relevant to luminescence and ESR", Ancient TL 33, 1 (2015)
- L. Martin et al., "Dosimetric study of sediments at the beta dose rate scale: Characterization and modelization with the DosiVox software", Radiat. Meas. 81, 134 (2015)
- C. Michelet et al., "Quantitative reconstruction of PIXE-tomography data for thin samples using GUPIX X-ray emission yields", Nucl. Instrum. Meth. B 348, 92 (2015)
- C. Michelet et al., "Development and applications of STIM- and PIXE-tomography: A review", Nucl. Instrum. Meth. B 363, 55 (2015)
- P. Morfouace et al., "Evolution of single-particle strength in neutron-rich ^{71}Cu ", Phys. Lett. B 751, 306 (2015)
- M. Moussavou et al., "Multicellular Consortia Preserved in Biogenic Ductile-Plastic Nodules of Okondja Basin (Gabon) by 2.1 Ga", J. Geol. Geophys. 4, 195 (2015)
- K. Nishio et al., "Excitation energy dependence of fragment-mass distributions from fission of $^{180,190}\text{Hg}$ formed in fusion reactions of $^{36}\text{Ar} + ^{144,154}\text{Sm}$ ", Phys. Lett. B 748, 89 (2015)
- L. Perrin et al., "Evaluation of sample preparation methods for single cell quantitative elemental imaging using proton or synchrotron radiation focused beams", J. Anal. At. Spectrom. 30, 2525 (2015)
- Q. T. Pham et al., "Coupling of Geant4-DNA physics models into the GATE Monte Carlo platform: Evaluation of radiation-induced damage for clinical and preclinical radiation therapy beams", Nucl. Instrum. Meth. B 353, 46 (2015)
- K. Pomorski, B. Nerlo-Pomorska, and P. Quentin, " β decay of ^{252}Cf in the transition from the exit point to scission", Phys. Rev. C 91, 054605 (2015)
- M. Rosenbusch et al., "Probing the $N = 32$ shell closure below the magic proton number $Z = 20$: Mass measurements of the exotic isotopes $^{52,53}\text{K}$ ", Phys. Rev. Lett. 114, 202501 (2015)
- S. Roudeau et al., "Reduced net charge and heterogeneity of pl isoforms in familial amyotrophic lateral sclerosis mutants of copper/zinc superoxide dismutase", Electrophoresis 36, 2482 (2015)
- W. Ryssens et al., "Solution of the Skyrme-HF+BCS equation on a 3D mesh, II: A new version of the Ev8 code", Comput. Phys. Commun. 187, 175 (2015)
- W. Ryssens, M. Bender, and P. H. Heenen, "Numerical accuracy of mean-field calculations in coordinate space", Phys. Rev. C 92, 064318 (2015)
- K.-H. Schmidt and B. Jurado, "Revealing hidden regularities with a general approach to fission", Eur. Phys. J. A 51, 176 (2015)
- J. I. Shin et al., "Simulation study of dose enhancement in a cell due to nearby carbon and oxygen in particle radiotherapy", J. Korean Phys. Soc. 67, 209 (2015)
- J. I. Shin et al., "Proton Linear Energy Transfer measurement using Emulsion Cloud Chamber", Nucl. Instrum. Meth. B 349, 201 (2015)
- N. Theodorakopoulos et al., "Use of combined microscopic and spectroscopic techniques to reveal interactions between uranium and Microbacterium sp. A9, a strain isolated from the Chernobyl exclusion zone", J. Hazard. Mater. 285, 285 (2015)
- H. N. Tran et al., "Modeling proton and alpha elastic scattering in liquid water in Geant4DNA", Nucl. Instrum. Meth. B 343, 132 (2015)
- Q. L. Trequesser et al., "Multimodal correlative microscopy for in situ detection and quantification of chemical elements in biological specimens. Applications to nanotoxicology", J. Chem. Biol. 8, 159 (2015)
- L. Vyšín et al., "Proton-induced direct and indirect damage of plasmid DNA", Radiat. Environ. Biophys. 54, 343 (2015)
- F. Westall et al., "Archean (3.33 Ga) microbe-sediment systems were diverse and flourished in a hydrothermal context", Geology 43, 615 (2015)
- J. M. Yao, M. Bender, and P.-H. Heenen, "Beyond mean-field study of elastic and inelastic electron scattering off nuclei", Phys. Rev. C 91, 024301 (2015)
- T. Duguet et al., "Ab initio-driven nuclear energy density functional method", Eur. Phys. J. A 51, 162 (2015)
- H. Abdallah et al., "Search for dark matter annihilations towards the inner Galactic halo from 10 years of observations with H.E.S.S.", Phys. Rev. Lett. 117, 111301 (2016)
- H. Abdalla et al., "H.E.S.S. Limits on Linelike Dark Matter Signatures in the 100 GeV to 2 TeV Energy Range Close to the Galactic Center", Phys. Rev. Lett. 117, 151302 (2016)
- Y. Abe et al., "Measurement of Θ^{13} in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques", Double Chooz Collaboration J. High Energy Phys. 1601, 163 (2016)
- Y. Abe et al., "Muon capture on light isotopes measured with the Double Chooz detector", Double Chooz Collaboration Phys. Rev. C 93, 054608 (2016)
- Y. Abe et al., "Characterization of the Spontaneous Light Emission of the PMTs used in the Double Chooz Experiment", J. Instrum. 11, P08001 (2016)
- A. Abramowski et al., "Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre", Nature 531, 476 (2016)
- F. Acero et al., "The First Fermi LAT Supernova Remnant Catalog", Astrophys. J. Suppl. S. 224, 8 (2016)
- M. Ackermann et al., "2FHL: The Second Catalog of Hard Fermi-LAT Sources", Astrophys. J. Suppl. S. 222, 5 (2016)
- M. Ackermann et al., "Deep view of the Large Magellanic Cloud with six years of Fermi-LAT observations", Astron. Astrophys. 586, A71 (2016)
- M. Ackermann et al., "Resolving the Extragalactic γ -Ray Background above 50 GeV with the Fermi Large Area Telescope", Phys. Rev. Lett. 116, 151105 (2016)
- M. Ackermann et al., "Fermi-LAT Observations of the LIGO event GW150914", Astrophys. J. 823, L2 (2016)

2016

- M. Ackermann et al., "Minute-Timescale >100 MeV gamma-ray variability during the giant outburst of quasar 3C 279 observed by Fermi-LAT in 2015 June", *Astrophys. J.* 824, L20 (2016)
- M. Ackermann et al., "Measurement of the high-energy gamma-ray emission from the Moon with the Fermi Large Area Telescope", *Phys. Rev. D* 93, 082001 (2016)
- Z. Aitelhadjali et al., "Fivefold differential cross sections for electron-induced double ionization of outer and inner valence (1t2 and 2a1) molecular orbitals of CH₄", *Int. J. Mass Spectrom.* 403, 53 (2016)
- M. Ajello et al., "Fermi-LAT Observations of High-Energy γ -Ray Emission Toward the Galactic Center", *Astrophys. J.* 819, 44 (2016)
- M. Ajello et al., "Deep morphological and spectral study of the SNR RCW 86 with FermiLAT", *Astrophys. J.* 819, 98 (2016)
- J. Allison et al., and the Geant4 Collaboration, "Recent developments in Geant4", *Nucl. Instrum. Meth. A* 835, 186 (2016)
- L. Armand et al., "Long-term exposure of A549 cells to titanium dioxide nanoparticles induces DNA damage and sensitizes cells towards genotoxic agents", *Nanotoxicology* 10, 913 (2016)
- F. X. Arnaud et al., "Complex cell geometry and sources distribution model for Monte Carlo single cell dosimetry with iodine-125 radioimmunotherapy", *Nucl. Instrum. Meth. B* 366, 227 (2016)
- R. Arnold et al (The NEMO-3 Collaboration), "Measurement of the double-beta decay half-life and search for the neutrinoless double-beta decay of ⁴⁸Ca with the NEMO-3 detector", *Phys. Rev. D* 93, 112008 (2016)
- R. Arnold et al (The NEMO-3 Collaboration), "Measurement of the $2\nu\beta\beta$ decay half-life of ¹⁵⁰Nd and a search for $0\nu\beta\beta$ decay processes with the full exposure from the NEMO-3 detector", *Phys. Rev. D* 94, 072003 (2016)
- O. V. Belov et al., "Radiation damage to neuronal cells: Simulating the energy deposition and water radiolysis in a small neural network", *Phys. Medica* 32, 1510 (2016)
- B. Blank et al., "New neutron-deficient isotopes from ⁷⁸Kr fragmentation", *Phys. Rev. C* 93, 061301 (2016)
- M. Böck et al., "Radio and Gamma-ray Properties of Extragalactic Jets from the TANAMI Sample", *Astron. Astrophys.* 590, 1 (2016)
- M.-C. Bordage et al., "Implementation of new physics models for low energy electrons in liquid water in Geant4-DNA", *Phys. Medica* 32, 1833 (2016)
- R. J. Britto et al., "Fermi-LAT Observations of the 2014 May-July Outburst from 3C 454.3", *Astrophys. J.* 830, 162 (2016)
- S. Calinescu et al., "Coulomb excitation of ⁴⁴Ca and ⁴⁶Ar", *Phys. Rev. C* 93, 044333 (2016)
- R. Capote, N. Carjan, and S. Chiba, "Scission neutrons for U, Pu, Cm, and Cf isotopes: Relative multiplicities calculated in the sudden limit", *Phys. Rev. C* 93, 024609 (2016)
- I. Čeliković et al., "New Isotopes and Proton Emitters—Crossing the Drip Line in the Vicinity of ¹⁰⁰Sn", *Phys. Rev. Lett.* 116, 162501 (2016)
- M. Comet et al., "Absolute Energy Distributions of Al, Cu and Ta ions produced by laser generated plasma at 10¹³ W·cm⁻²", *J. Appl. Phys.* 119, 013301 (2016)
- F. De Grancey et al., "An above-barrier resonance in ¹⁵F", *Phys. Lett. B* 758, 26 (2016)
- M. M. da Cunha et al., "Overview of chemical imaging methods to address biological questions", *Micron* 84, 23 (2016)
- Q. Ducasse et al., "Investigation of the ²³⁸U(d, p) surrogate reaction via the simultaneous measurement of γ -decay and fission probabilities", *Phys. Rev. C* 94, 024614 (2016)
- Q. Ducasse et al., "Application of the EXtrapolated Efficiency Method (EXEM) to infer the gamma-cascade detection efficiency in the actinide region", *Nucl. Instrum. Meth. A* 826, 60 (2016)
- E. Engels et al., "Optimizing dose enhancement with Ta₂O₅ nanoparticles for synchrotron microbeam activated radiation therapy", *Phys. Medica* 32, 1852 (2016)
- E. Gilabert et al., "Ultratrace analysis of krypton isotopes by resonant ionization spectroscopy time of flight mass spectrometry (RIS-TOF)", *J. Anal. At. Spectrom.* 31, 994 (2016)
- J. Giovinazzo et al., "GET electronics samples data analysis", *Nucl. Instrum. Meth. A* 840, 15 (2016)
- F. Gobet et al., "Experimental and Monte Carlo absolute characterization of a medical electron beam using a magnetic spectrometer", *Radiat. Meas.* 86, 16 (2016)
- T. Goigoux et al., "Two-Proton Radioactivity of ⁶⁷Kr", *Phys. Rev. Lett.* 117, 162501 (2016)
- S. Grévy, "High intensity ion guides and purification techniques for low energy radioactive ion beams", *Nucl. Instrum. Meth. B* 376, 200 (2016)
- L. Guillemot et al., "The gamma-ray millisecond pulsar deathline, revisited New velocity and distance measurements", *Astron. Astrophys.* 587, A109 (2016)
- S. Incerti et al., "Review of Geant4-DNA applications for micro and nanoscale simulations", *Phys. Medica* 32, 1187 (2016)
- S. Incerti et al., "Simulation of Auger electron emission from nanometer-size gold targets using the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit", *Nucl. Instrum. Meth. B* 372, 91 (2016)
- C. Jiang et al., "Implantation damage in heavy gas implanted 4H-SiC", *Nucl. Instrum. Meth. B* 374, 71 (2016)
- H. Katagiri et al., "Fermi Large Area Telescope Observations of the Monoceros Loop Supernova Remnant", *Astrophys. J.* 831, 106 (2016)
- O. Keta et al., "The impact of autophagy on cell death modalities in CRL-5876 lung adenocarcinoma cells after their exposure to γ -rays and/or erlotinib", *Cell Biol. Toxicol.* 32, 83 (2016)
- I. Kyriakou et al., "The impact of new Geant4-DNA cross section models on electron track structure simulations in liquid water", *J. Appl. Phys.* 119, 194902 (2016)
- M.-H. Koh et al., "Band-head spectra of low-energy single-particle excitations in some well deformed, odd-mass heavy nuclei within a microscopic approach", *Eur. Phys. J. A* 52, 3 (2016)
- N. Lampe et al., "Simulating the Impact of the Natural Radiation Background on Bacterial Systems: Implications for Very Low Radiation Biological Experiments", *PLoS One* 11, e0166364 (2016)
- C. Larue et al., "Innovative combination of spectroscopic techniques to reveal nanoparticle fate in a crop plant", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 119, 17 (2016)
- B. Lavielle et al., "Development towards a double focusing isotopic separator for noble gas isotope enrichment", *J. Mass Spectrom.* 51, 718 (2016)
- R. Léguillon et al., "Fission fragments mass distributions of nuclei populated by the multinucleon transfer channels of the ¹⁸O + ²³²Th reaction", *Phys. Lett. B* 761, 125 (2016)
- S. McKinnon et al., "Local dose enhancement of proton therapy by ceramic oxide nanoparticles investigated with Geant4 simulations", *Phys. Medica* 32, 1584 (2016)
- S. McKinnon et al., "Study of the effect of ceramic Ta₂O₅ nanoparticle distribution on cellular dose enhancement in a kilovoltage photon field", *Phys. Medica* 32, 1216 (2016)
- F. E. Marshall et al., "A New, Low Braking Index for the LMC Pulsar B0540-69", *Astrophys. J. Lett.* 827, L39 (2016)
- L. Martin, N. Mercier, and S. Incerti, "Comparison of DosiVox simulation results with tabulated data and standard calculations", *Ancient TL* 33, 1 (2016)
- S. Meylan et al., "Geant4-DNA simulations using complex DNA geometries generated by the DnaFabric tool", *Comput. Phys. Commun.* 204, 159 (2016)
- J. Okołowicz et al., "Consistent analysis of one-nucleon spectroscopic factors involving weakly- and strongly-bound nucleons", *Phys. Lett. B* 757, 303 (2016)
- S. E. Orrigo et al., " β decay of the exotic T = -2 nuclei ⁴⁸Fe, ⁵²Ni and ⁵⁶Zn", *Phys. Rev. C* 93, 044336 (2016)
- S. E. Orrigo et al., "Observation of the 2⁺ isomer in ⁵²Co", *Phys. Rev. C* 94, 044315 (2016)

R. Ortega et al., " **α -Synuclein over-expression induces increased iron accumulation and redistribution in iron-exposed neurons**", *Molecular Neurobiology* 53, 1925 (2016)

E. Paredes et al., "**Evidence of isotopic fractionation of natural uranium in cultured human cells**", *PNAS* 113, 14007 (2016)

P. P. Povinec et al., "**Reference material for natural radionuclides in glass designed for underground experiments**", *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 307, 619 (2016)

E. M. Ramirez et al., "**Conception of PIPERADE: A high-capacity Penning- trap mass separator for high isobaric contamination at DESIR**", *Nucl. Instrum. Meth. B* 376, 298 (2016)

L. Ramond et al., "**Dilatometric study of a co-converted (U, Am) O_2 powder**", *J. Eur. Ceram. Soc.* 36, 1775 (2016)

M. Rizea and N. Carjan, "**Fourier transforms of single-particle wave functions in cylindrical coordinates**", *Eur. Phys. J. A* 52, 368 (2016)

B. Rubio et al., "**Comparison of beta-decay and charge-exchange reactions in mirror T=2 nuclei and isospin mixing**", *Nucl. Phys. Rev.* 33, 225 (2016)

P. Russotto et al., "**Results of the ASY-EOS experiment at GSI: The symmetry energy at supra-saturation density**", *Phys. Rev. C* 94, 034608 (2016)

D. Sakata et al., "**An implementation of discrete electron transport models for gold in the Geant4 simulation toolkit**", *J. Appl. Phys.* 120, 244901 (2016)

K.-H. Schmidt et al., "**General Description of Fission Observables: GEF Model Code**", *Nucl. Data Sheets* 131, 107 (2016)

N. A. Smirnova et al., "**Theoretical analysis of isospin mixing with the β decay of ^{56}Zn** ", *Phys. Rev. C* 93, 044305 (2016)

J. Su et al., "**Revalidation of the isobaric multiplet mass equation at $A = 53$, $T = 3/2$** ", *Phys. Lett. B* 756, 323 (2016)

D. Suzuki et al., "**Second 0^+ state of unbound ^{12}O : Scaling of mirror asymmetry**", *Phys. Rev. C* 93, 024316 (2016).

H. N. Tran et al., "**Single electron ionization and electron capture cross sections for (C^+ , H_2O) interaction within the Classical Trajectory Monte Carlo (CTMC) approach**", *Nucl. Instrum. Meth. B* 366, 140 (2016)

H. N. Tran et al., "**Geant4 Monte Carlo simulation of absorbed dose and radiolysis yields enhancement from a gold nanoparticle under MeV proton irradiation**", *Nucl. Instrum. Meth. B* 373, 126 (2016)

M. Versteegen et al., "**Low-energy modification of the γ strength function of the odd-even nucleus ^{115}In** ", *Phys. Rev. C* 94, 044325 (2016)

2017

B. P. Abbott et al., "**Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger**", *Astrophys. J. Lett.* 848, L12 (2017)

H. Abdalla et al., "**Characterizing the γ -ray long-term variability of PKS 2155-304 with H.E.S.S. and Fermi-LAT**", *Astron. Astrophys.* 598, A39 (2017)

H. Abdalla et al., "**First limits on the very-high energy gamma-ray afterglow emission of a fast radio burst: H.E.S.S. observations of FRB 150418**", *Astron. Astrophys.* 597, A115 (2017)

H. Abdalla et al., "**Gamma-ray blazar spectra with H.E.S.S. II mono analysis: The case of PKS 2155-304 and PG 1553+113**", *Astron. Astrophys.* 600, A89 (2017)

H. Abdalla et al., "**Measurement of the EBL spectral energy distribution using the VHE γ -ray spectra of H.E.S.S. blazars**", *Astron. Astrophys.* 606, A59 (2017)

H. Abdalla et al., "**TeV gamma-ray observations of the binary neutron star merger GW170817 with H.E.S.S.**", *Astrophys. J.* 850, L22 (2017)

T. Abrahão et al., "**Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors**", *Double Chooz Collaboration J. Cosmol. Astropart. P.* 1702, 017 (2017)

M. Ackermann et al., "**Search for Extended Sources in the Galactic Plane Using Six Years of Fermi-Large Area Telescope Pass 8 Data above 10 GeV**", *Astrophys. J.* 843, 139 (2017)

M. Ajello et al., "**3FHL: The Third Catalog of Hard Fermi-LAT Sources**", *Astrophys. J. Suppl.* S. 232, 18 (2017)

B. Andel et al., "**Detailed α -decay study of ^{180}Tl** ", *Phys. Rev. C* 96, 054327 (2017)

R. Arnold et al., "**Search for neutrinoless quadruple- β decay of ^{150}Nd with the NEMO-3 detector**", *Phys. Rev. Lett.* 119, 041801 (2017)

R. Arnold et al., "**Measurement of the $2\nu\beta\beta$ Decay Half-Life and Search for the $0\nu\beta\beta$ Decay of ^{116}Cd with the NEMO-3 Detector**", *Phys. Rev. D* 95, 012007 (2017)

M. Baqué et al., "**Irradiation effects on antibody performance in the frame of biochip-based instruments development for space exploration**", *Int. J. Astrobiol.* 16, 82 (2017)

A. S. Barabash et al., "**Calorimeter development for the SuperNEMO double beta decay experiment**", *Nucl. Instrum. Meth. A* 868, 98 (2017)

A. S. Barabash et al., "**The BiPo-3 detector for the measurement of ultra low natural radioactivities of thin materials**", *SuperNEMO Collaboration, J. Instrum.* 12, P06002 (2017)

P. Barberet et al., "**Cell micro-irradiation with MeV protons counted by an ultra-thin diamond membrane**", *Appl. Phys. Lett.* 111, 243701 (2017)

K. Benrabia et al., "**Triaxial quadrupole dynamics and the inner fission barrier of some heavy even-even nuclei**", *Phys. Rev. C* 96, 034320 (2017)

S. Biswas et al., "**Differential electron emission from polycyclic aromatic hydrocarbon molecules under fast ion impact**", *Sci. Rep.* 7, 5560 (2017)

D. Bolst et al., "**Validation of Geant4 fragmentation for Heavy Ion Therapy**", *Nucl. Instrum. Meth. A* 869, 68 (2017)

J. Bordes et al., "**Low-energy electron dose-point kernel simulations using new physics models implemented in Geant4-DNA**", *Nucl. Instrum. Meth. B* 398, 13 (2017)

V. B. Brudanan et al., "**Development of the ultra-low background HPGe spectrometer OBELIX at Modane underground laboratory**", *J. Inst.* 12 02, P02004 (2017)

P. A. Burr, D. Horlait, and W. E. Lee, "**Experimental and DFT investigations of (Cr, Ti) 3 AIC2 MAX phases stability**", *Mater. Res. Lett.* 5, 144 (2017)

N. Carjan, F. A. Ivanyuk, and Y. T. Oganessian, "**Pre-scission model predictions of fission fragment mass distributions for super-heavy elements**", *Nucl. Phys. A* 968, 453 (2017)

A. Carmona et al., "**Heterogeneous intratumoral distribution of gadolinium nanoparticles within U87 human glioblastoma xenografts unveiled by micro-PIXE imaging**", *Anal. Biochem.* 523, 50 (2017)

C. Gasparini et al., "**Zirconium carbide oxidation: Maltese cross formation and interface characterization**", *Oxid Met* 88, 509 (2017)

B. Condon et al., "**Detection of two TeV shell-type remnants at GeV energies with FermiLAT: HESS J1731-347 and SN 1006**", *Astrophys. J.* 851, 100 (2017)

G. Coussot et al., "**Biochip-based instruments development for space exploration: influence of the antibody immobilization process on the chip resistance to freeze-drying, temperature shifts and cosmic radiations**", *Int. J. Astrobiol.* 16, 190 (2017)

R. Delorme et al., "**Comparison of gadolinium nanoparticles and molecular contrast agents for radiation therapy- enhancement**", *Med. Phys.* 44, 5949 (2017)

- D. Denis-Petit et al., "Calculation of the rate of nuclear excitation by electron transition in an ^{84}mRb plasma under the hypothesis of local thermodynamic equilibrium using a multiconfiguration Dirac-Fock approach", *Phys. Rev. C* 96, 024604 (2017)
- A. Edou-Minko et al., "An Akouemma hemisphaeria organic microfossils colony hosting biodiversity assemblage on the seafloor of Okondja Basin (Gabon) dated at 2.2 Ga", *J. Geol. Geophys.* 6, 281 (2017)
- A. Edou-Minko et al., "Growth, duplication and lateral mutual compressive deformation of Akouemma hemisphaeria on the seafloor of Okondja Basin at 2.2 Ga (Gabon)", *Int. J. Geosci.* 8, 1172 (2017)
- C. Fontbonne et al., "High precision measurement of the ^{19}Ne β -decay half-life using real-time digital acquisition", *Phys. Rev. C* 96, 065501 (2017)
- Z. Francis et al., "Calculation of ionisation lineal energies for water and DNA bases using the Rudd model cross sections", *J. Appl. Phys.* 122, 014701 (2017)
- C. Gasparrini et al., "Oxidation of UC: An in situ high temperature environmental scanning electron microscopy study", *J. Nucl. Mater.* 494, 127 (2017)
- S. Giron et al., "Spectroscopy of ^{61}Fe via the neutron transfer reaction $^2\text{H}(^{60}\text{Fe}, p)^{61}\text{Fe}^*$ ", *Phys. Rev. C* 95, 035806 (2017)
- D. Giulietti et al., " $\text{D}+\text{D}$ fusion reactions in 10^{18} W/cm^2 intensity and repetitive laser-plasma interactions", *Europhys. Lett.* 119, 65001 (2017)
- A. Goldstein et al., "Fermi Observations of the LIGO Event GW170104", *Astrophys. J.* 846, L5 (2017)
- S. Guatelli and S. Incerti, "Monte Carlo simulations for medical physics: From fundamental physics to cancer treatment", *Phys. Medica* 33, 179 (2017)
- Y. K. Gupta et al., "Fission fragment yield distribution in the heavy-mass region from the $^{239}\text{Pu}(\text{nth}, \text{f})$ reaction", *Phys. Rev. C* 96, 014608 (2017)
- S. Incerti, I. Kyriakou, and H. N. Tran, "Geant4-DNA simulation of electron slowing-down spectra in liquid water", *Nucl. Instrum. Meth. B* 397, 45 (2017)
- P. Jean-Bapiste et al., "Vertical distribution of helium and $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ in porewaters of the Eastern Paris Basin (Bure/Haute-Marne): constraints on transport processes through the sedimentary sequence", Geological Society, London, Special Publications 443, 179 (2017)
- M.-H. Koh et al., "Fission barriers of two odd-neutron actinide nuclei taking into account the time-reversal symmetry breaking at the mean-field level", *Phys. Rev. C* 95, 014315 (2017)
- I. Kyriakou et al., "Microdosimetry of electrons in liquid water using the low-energy models of Geant4", *J. Appl. Phys.* 122, 024303 (2017)
- K. Hirose et al., "Role of Multichance Fission in the Description of Fission-Fragment Mass Distributions at High Energies", *Phys. Rev. Lett.* 119, 222501 (2017)
- L. Kucuk et al., "Half-life determination of $T = -1$ and $T = -1/2$ proton-rich nuclei and the β^+ decay of ^{58}Zn ", *Eur. Phys. J. A* 53, 134 (2017)
- R. Lică et al., " β decay studies of n-rich Cs isotopes with the ISOLDE Decay Station", *J. Phys. G-Nucl. Partic.* 44, 054002 (2017)
- R. Lică et al., "Identification of the crossing point at $N = 21$ between normal and intruder configurations", *Phys. Rev. C* 95, 021301 (2017)
- W. Liu et al., "Calculation on spectrum of direct DNA damage induced by low-energy electrons including dissociative electron attachment", *Radiat. Environ. Biophys.* 56, 99 (2017)
- C. Magron et al., "Precise measurements of half-lives and branching ratios for the β mirror transitions in the decay of ^{23}Mg and ^{27}Si ", *Eur. Phys. J. A* 53, 77 (2017)
- V. Manea et al., "Penning-trap mass spectrometry and mean-field study of nuclear shape coexistence in the neutron-deficient lead region", *Phys. Rev. C* 95, 054322 (2017)
- P. Marini et al., "Systematic investigation of background sources in neutron flux measurements with a proton-recoil silicon detector", *Nucl. Instrum. Meth. A* 841, 56 (2017)
- P. Marini et al., " ^{242}Pu neutron-induced fission cross-section measurement from 1 to 2 MeV neutron energy", *Phys. Rev. C* 96, 054604 (2017)
- S. Meylan et al., "Simulation of early DNA damage after the irradiation of a fibroblast cell nucleus using Geant4-DNA", *Sci. Rep.* 7, 11923 (2017)
- C. Michelet et al., "An implementation of the NiftyRec medical imaging library for PIXE tomography reconstruction", *Nucl. Instrum. Meth. B* 404, 131 (2017)
- A. I. Morales et al., "Simultaneous investigation of the $T = 1$ ($J^\pi = 0^+$) and $T = 0$ ($J^\pi = 9^+$) β decays in ^{70}Br ", *Phys. Rev. C* 95, 064327 (2017)
- G. Muggioli et al., "Single α -particle irradiation permits real-time visualization of RNF8 accumulation at DNA damaged sites", *Sci. Rep.* 7, 41764 (2017)
- J. Park et al., "Properties of γ -decaying isomers and isomeric ratios in the ^{100}Sn region", *Phys. Rev. C* 96, 044311 (2017)
- E. Pellereau et al., "Accurate isotopic fission yields of electromagnetically induced fission of ^{238}U measured in inverse kinematics at relativistic energies", *Phys. Rev. C* 95, 054603 (2017)
- L. Perrin et al., "Zinc and Copper Effects on Stability of Tubulin and Actin Networks in Dendrites and Spines of Hippocampal Neurons", *ACS Chem. Neurosci.* 8, 1490 (2017)
- E. Petroff et al., "A polarized fast radio burst at low Galactic latitude", *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 469, 4465 (2017)
- N. Rabhi et al., "Calibration of imaging plate detectors to mono-energetic protons in the range 1-200 MeV", *Rev. Sci. Instrum.* 88, 113301 (2017)
- J. L. Racusin et al., "Searching the Gamma-ray sky for Counterparts to Gravitational Wave Sources: Fermi Gamma-ray Burst Monitor and Large Area Telescope Observations of LVT151012 and GW151226", *Astrophys. J.* 835, 82 (2017)
- J. Ramos-Méndez et al., "Flagged uniform particle splitting for variance reduction in proton and carbon ion track-structure simulations", *Phys. Med. Biol.* 62, 5908 (2017)
- X. Raymond et al., "Energy distributions of electrons emitted by a biased laser-produced plasma at $1013 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ", *J. Appl. Phys.* 122, 173302 (2017)
- R. Reifarh et al., "Spallation-based neutron target for direct studies of neutron-induced reactions in inverse kinematics", *Phys. Rev. Accel. Beams* 20, 044701 (2017)
- V. Saltas et al., "Modelling solid solutions with cluster expansion, special quasirandom structures, and thermodynamic approaches", *Appl. Phys. Rev.* 4, 041301 (2017)
- N. Severijns and B. Blank, "Weak interaction physics at ISOLDE", *J. Phys. G-Nucl. Partic.* 44, 074002 (2017)
- M. Simon et al., "In situ quantification of diverse titanium dioxide nanoparticles unveils selective endoplasmic reticulum stress-dependent toxicity", *Nanotoxicology* 11, 134 (2017)
- N. A. Smirnova et al., "Isospin mixing from β -delayed proton emission", *Phys. Rev. C* 95, 054301 (2017)
- M. Souici et al., "Single- and Double-Strand Breaks of Dry DNA Exposed to Protons at Bragg-Peak Energies", *J. Phys. Chem. B* 121, 497 (2017)
- J. J. Tello et al., "Numerical insight into the Dual Radiation Action Theory", *Phys. Medica* 43, 120 (2017)
- N. Theodorakopoulos et al., "Soil prokaryotic communities in Chernobyl waste disposal trench T22 are modulated by organic matter and radionuclide contamination", *FEMS Microbiol. Ecol.* 93, 8 (2017)
- B. G. Trist et al., "Amyotrophic lateral sclerosis-like superoxide dismutase 1 proteinopathy is associated with neuronal loss in Parkinson's disease brain", *Acta Neuropathol.* 134, 113 (2017)
- D. W. M. Walsh et al., "Live cell imaging of mitochondria following targeted irradiation in situ reveals rapid and highly localized loss of membrane potential", *Sci. Rep.* 7, 46684 (2017)
- J. Wilson et al., "Anomalies in the Charge Yields of Fission Fragments from the $^{238}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ Reaction", *Phys. Rev. Lett.* 118, 222501 (2017)

X. X. Xu et al., "Observation of β -delayed two-proton emission in the decay of ^{22}Si ", Phys. Lett. B 766, 312 (2017)

P. Zanotti-Fregonara et al., "Predicting the outcome of peptide receptor radionuclide therapy in neuroendocrine tumors: the importance of dual-tracer imaging", Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imag. 44, 1095 (2017)

E. Zapata-Solvas et al., "Experimental synthesis and density functional theory investigation of radiation tolerance of Zr 3 (Al 1-x Si x)C 2 MAX phases", J. Am. Ceram. Soc. 100, 1377 (2017)

E. Zapata-Solvas et al., "Synthesis and physical properties of (Zr 1-x, Ti x) 3 AlC 2 MAX phases", J. Am. Ceram. Soc. 100, 3393 (2017)

2018

M. G. Aartsen et al., "Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with highenergy neutrino IceCube-170922A", Science 361, eaat1378 (2018)

H. Abdalla et al., "Detection of variable VHE γ -ray emission from the extra-galactic γ -ray binary LMC P3", Astron. Astrophys. 610, L17 (2018)

H. Abdalla et al., "The H.E.S.S. Galactic plane survey", Astron. Astrophys. 612, A1 (2018)

H. Abdalla et al., "The population of TeV pulsar wind nebulae in the H.E.S.S. Galactic Plane Survey", Astron. Astrophys. 612, A2 (2018)

H. Abdalla et al., "Population study of Galactic supernova remnants at very high γ -ray energies with H.E.S.S.", Astron. Astrophys. 612, A3 (2018)

H. Abdalla et al., "The supernova remnant W49B as seen with H.E.S.S. and Fermi-LAT", Astron. Astrophys. 612, A5 (2018)

H. Abdalla et al., "H.E.S.S. observations of RX J1713.7-3946 with improved angular and spectral resolution: Evidence for gamma-ray emission extending beyond the X-ray emitting shell", Astron. Astrophys. 612, A6 (2018)

H. Abdalla et al., "Deeper H.E.S.S. observations of Vela Junior (RX J0852.0-4622): Morphology studies and resolved spectroscopy", Astron. Astrophys. 612, A7 (2018)

H. Abdalla et al., "A search for new supernova remnant shells in the Galactic plane with H.E.S.S.", Astron. Astrophys. 612, A8 (2018)

H. Abdalla et al., "Characterising the VHE diffuse emission in the central 200 parsecs of our Galaxy with H.E.S.S.", Astron. Astrophys. 612, A9 (2018)

H. Abdalla et al., "A search for very high-energy flares from the microquasars GRS 1915+105, Circinus X-1, and V4641 Sgr using contemporaneous H.E.S.S. and RXTE observations", Astron. Astrophys. 612, A10 (2018)

H. Abdalla et al., "Extended VHE γ -ray emission towards SGR1806-20, LBV 1806-20, and stellar cluster Cl* 1806-20", Astron. Astrophys. 612, A11 (2018)

H. Abdalla et al., "Systematic search for very-high-energy gamma-ray emission from bow shocks of runaway stars", Astron. Astrophys. 612, A12 (2018)

H. Abdalla et al., "HESS J1741-302: a hidden accelerator in the Galactic plane", Astron. Astrophys. 612, A13 (2018)

H. Abdalla et al., "The starburst galaxy NGC 253 revisited by H.E.S.S. and Fermi-LAT", Astron. Astrophys. 617, A73 (2018)

H. Abdalla et al., "The γ -ray spectrum of the core of Centaurus A as observed with H.E.S.S. and Fermi-LAT", Astron. Astrophys. 619, A71 (2018)

H. Abdalla et al., "First Ground-based Measurement of Sub-20 GeV to 100 GeV γ -rays from the Vela Pulsar with H.E.S.S. II", Astron. Astrophys. 620, A66 (2018)

H. Abdalla et al., "H.E.S.S. discovery of very high energy γ -ray emission from PKS 0625354", Mon. Not. R. Astron. Soc. 476, 4187 (2018)

H. Abdallah et al., "Search for γ -Ray Line Signals from Dark Matter Annihilations in the Inner Galactic Halo from 10 Years of Observations with H.E.S.S.", Phys. Rev. Lett. 120, 201101 (2018)

H. Abdalla et al., "Searches for gamma-ray lines and 'pure WIMP' spectra from Dark Matter annihilations in dwarf galaxies with H.E.S.S.", J. Cosmol. Astropart. P. 1811, 037 (2018)

S. Abdollahi et al., "A gamma-ray determination of the Universe's star formation history", Science 362, 1031 (2018)

A. U. Abeysekara et al., "VERITAS and Fermi-LAT Observations of TeV Gamma-Ray Sources Discovered by HAWC in the 2HWC Catalog", Astrophys. J. 866, 24 (2018)

T. Abrahão et al., "Novel event classification based on spectral analysis of scintillation waveforms in Double Chooz", Double Chooz Collaboration J. Instrum. 13, P01031 (2018)

A. Abramowski et al., "Detailed spectral and morphological analysis of the shell type supernova remnant RCW 86", Astron. Astrophys. 612, A4 (2018)

M. Ackermann et al., "The Search for Spatial Extension in High-latitude Sources Detected by the Fermi Large Area Telescope", Astrophys. J. Suppl. S. 237, 32 (2018)

N. Agafonova et al., "Study of charged hadron multiplicities in charged-current neutrino-lead interactions in the OPERA detector", Eur. Phys. J. C 78, 62 (2018)

N. Agafonova et al., "Final results of the search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillations with the OPERA detector in the CNGS beam", J. High Energy Phys. 1806, 151 (2018)

N. Agafonova et al., "Final Results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS Neutrino Beam", Phys. Rev. Lett. 120, 211801 (2018)

M. Ajello et al., "Fermi-LAT Observations of LIGO/Virgo Event W170817", Astrophys. J. 861, 85 (2018)

M. L. Ahnen et al., "Constraints on particle acceleration in SS433/W50 from MAGIC and H.E.S.S. observations", Astron. Astrophys. 612, A14 (2018)

M. L. Ahnen et al., "Multi-wavelength characterization of the blazar S5 0716+714 during an unprecedented outburst phase", Astron. Astrophys. 619, A45 (2018)

Q. Arnaud et al., "First results from the NEWS-G direct dark matter search experiment at the LSM", Astropart. Phys. 97, 54 (2018)

R. Arnold et al., "Final results on ^{82}Se double beta decay to the ground state of ^{82}Kr from the NEMO-3 experiment", Eur. Phys. J. C 78, 821 (2018)

S. Bakr et al., "Last Geant4 developments for PIXE applications", Nucl. Instrum. Meth. B 436, 285 (2018)

B. Blank et al., "Evaluation of fusion-evaporation cross-section calculations", Nucl. Instrum. Meth. B 416, 41 (2018)

B. Blank et al., "Gamma-ray branching ratios in the decay of ^{49}Cr ", Eur. Phys. J. A 54, 93 (2018)

J.-C. Caillon, "A possible unification of Newton's and Coulomb's forces", Phys. Lett. A 382, 3307 (2018)

A. Carmona et al., "Uranium exposure of human dopaminergic cells results in low cytotoxicity, accumulation within sub-cytoplasmic regions, and down regulation of MAO-B", Neurotoxicology 68, 177 (2018)

C. J. Clark et al., "Einstein@Home discovers a radio-quiet gamma-ray millisecond pulsar", Sci. Adv. 4, eaao7228 (2018)

D. Denis-Petit, M. Tarisien, "Laser driven de-excitation of ^{84}Rb ", Applications of Laser-Driven Particle Acceleration, Eds. Parodi, Bolton, Schreiber, CRC press, ISBN 9781498766418 (5th june 2018)

J.-E. Ducret et al., "Calibration of the low-energy channel Thomson parabola of the LMJPETAL diagnostic SEPAGE with protons and carbon ions", Rev. Sci. Instrum. 89, 023304 (2018)

L. de la Fuente Rosales et al., "Accounting for radiation-induced indirect damage on DNA with the Geant 4-DNA code", Phys. Medica 51, 108 (2018)

C. Gasparini et al., "Zirconium carbide oxidation: kinetics and oxygen diffusion through interface", J. Am. Ceram. Soc. 101, 2638 (2018)

- J. Giovino et al., "Metal-core pad-plane development for ACTAR TPC", Nucl. Instrum. Meth. A 892, 114 (2018)
- F. Gobet et al., "Signatures of fluid and kinetic properties in the energy distributions of multicharged Ta ions from nanosecond-laser-heated plasma", Phys. Rev. E 98, 063202 (2018)
- Y.-H. Hsieh et al., "Durability of hot uniaxially pressed Synroc derivative wasteform for EURO-GANEX wastes", J. Nucl. Mater. 509, 43 (2018)
- S. Incerti et al., "Geant4-DNA example applications for track structure simulations in liquid water: A report from the Geant4-DNA Project", Med. Phys. 45, e722 (2018)
- C. Ishizuka, S. Chiba, and N. Carjan, "Charge polarization and the elongation of the fissioning nucleus at scission", Rom. Rep. Phys. 70, 202 (2018)
- H. de Kerret et al., "Yields and production rates of cosmogenic ^6Li and ^7He measured with the Double Chooz near and far detectors", Double Chooz Collaboration J. High Energy Phys. 1811, 053 (2018)
- N. Lampe et al., "Mechanistic DNA damage simulations in Geant4-DNA part 1: A parameter study in a simplified geometry", Phys. Medica 48, 135 (2018)
- N. Lampe et al., "Mechanistic DNA damage simulations in Geant4-DNA part 2: Electron and proton damage in a bacterial cell", Phys. Medica 48, 146 (2018)
- J. Li et al., "Observing and Modeling the Gamma-Ray Emission from Pulsar/Pulsar Wind Nebula Complex PSR J0205+6449/3C 58", Astrophys. J. 858, 84 (2018)
- R. Lică et al., "Evolution of deformation in neutron-rich Ba isotopes up to $A = 150$ ", Phys. Rev. C 97, 024305 (2018)
- W. Liu et al., "Investigation on the correlation between energy deposition and clustered DNA damage induced by low-energy electrons", Radiat. Environ. Biophys. 57, 179 (2018)
- M.-Z. Liu et al., "Heavy-quark symmetry partners of the Pc (4450) pentaquark", Phys. Rev. D 98, 114030 (2018)
- H. Makii et al., "A new detector system for the measurement of high-energy prompt γ -rays for low-energy neutron induced fission", Nucl. Instrum. Meth. A 906, 88 (2018)
- L. Martin et al., "2D modelling: A Monte Carlo approach for assessing heterogeneous beta dose rate in luminescence and ESR dating: Paper I, theory and verification", Quat. Geochronol. 48, 25 (2018)
- A. L. McNamara et al., "Geometrical structures for radiation biology research as implemented in the TOPAS-nBio toolkit", Phys. Med. Biol. 63, 175018 (2018)
- A. Meregaglia et al., "Study of a spherical Xenon gas TPC for neutrinoless double beta detection", J. Instrum. 13, P01009 (2018)
- G. Muggioli et al., "In Situ Detection and Single Cell Quantification of Metal Oxide Nanoparticles Using Nuclear Microprobe Analysis", J. Vis. Exp. 132, e55041 (2018)
- E. Paredes et al., "A new procedure for high precision isotope ratio determinations of U, Cu and Zn at nanogram levels in cultured human cells: What are the limiting factors?", Talanta 178, 894 (2018)
- E. Paredes et al., "Impact of uranium uptake on isotopic fractionation and endogenous element homeostasis in human neuron-like cells", Sci. Rep. 8, 17163 (2018)
- J. Park et al., " β decays of the heaviest $N = Z - 1$ nuclei and proton instability of ^{97}In ", Phys. Rev. C 97, 051301 (2018)
- E. C. Pollacco et al., "GET: A generic electronics system for TPCs and nuclear physics instrumentation", Nucl. Instrum. Meth. A 887, 81 (2018)
- F. Porcaro et al., "Advances in element speciation analysis of biomedical samples using synchrotron-based techniques", Trends Anal. Chem. 104, 22 (2018)
- M. Rebhaoui et al., "Determination of a pairing residual interaction from Bohr quadrupole collective dynamics", J. Phys. G-Nucl. Partic. 45, 115102 (2018)
- T. Roger et al., "Demonstrator Detection System for the Active Target and Time Projection Chamber (ACTAR TPC) project", Nucl. Instrum. Meth. A 895, 126 (2018)
- N. I. Rukhadze et al., "Investigating the Double Beta Decay of ^{58}Ni ", Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 82, 708 (2018)
- D. Sakata et al., "Geant4-DNA track-structure simulations for gold nanoparticles: The importance of electron discrete models in nanometer volumes", Med. Phys. 45, 2230 (2018)
- C. Schmitt, K. H. Schmidt, and B. Jurado, "Benchmark of the GEF code for fission-fragment yields over an enlarged range in fissioning nucleus mass, excitation energy, and angular momentum", Phys. Rev. C 98, 044605 (2018)
- K.-H. Schmidt and B. Jurado, "Review on the progress in nuclear fission—experimental methods and theoretical descriptions", Rept. Prog. Phys. 81, 106301 (2018)
- W. G. Shin et al., "Development of a new Geant4-DNA electron elastic scattering model for liquid-phase water using the ELSEPA code", J. Appl. Phys. 124, 224901 (2018)
- N. Tang et al., "Simulation of early radiation-induced DNA damage on different types of cell nuclei", Radiat. Prot. Dosim. 183, 26 (2018)
- O. B. Tarasov et al., "Fission fragment yields from heavy-ion-induced reactions measured with a fragment separator", Eur. Phys. J. A 54, 66 (2018)
- M. Tarisien et al., "Scintillators in high-power laser-driven experiments", IEEE T. Nucl. Sci. 65, 2216 (2018)
- L. Tibaldo et al., "Disentangling multiple high-energy emission components in the Vela X pulsar wind nebula with the Fermi Large Area Telescope", Astron. Astrophys. 617, A78 (2018)
- F. Westall et al., "A Hydrothermal-Sedimentary Context for the Origin of Life", Astrobiol. 18, 259 (2018)
- K. Wimmer et al., "Shape coexistence and isospin symmetry in $A = 70$ nuclei: Spectroscopy of the $T_z = -1$ nucleus ^{70}Kr ", Phys. Lett. B 785, 441 (2018)
- L. Xayavong and N. A. Smirnova, "Radial overlap correction to superallowed $0^+ \rightarrow 0^+$ β decay reexamined", Phys. Rev. C 97, 024324 (2018)
- I. A. Zahradnik et al., "scCVD Diamond Membrane based Microdosimeter for Hadron Therapy", Phys. Status Solidi A 215, 1800383 (2018)

2019

H. Abdalla et al., "VHE γ -ray discovery and multi-wavelength study of the blazar 1ES 2322409", Mon. Not. R. Astron. Soc. 482, 3011 (2019)

H. Abdalla et al., "H.E.S.S. observations of the flaring gravitationally lensed galaxy PKS 1830–211", Mon. Not. R. Astron. Soc. 486, 3886 (2019)

H. Abdalla et al., "Particle Transport within the Pulsar Wind Nebula HESS J1825-137", Astron. Astrophys. 621, A116 (2019)

H. Abdalla et al., "Upper Limits on Very-High-Energy Gamma-ray Emission from Core-Collapse Supernovae Observed with H.E.S.S.", Astron. Astrophys. 626, A57 (2019)

H. Abdalla et al., "H.E.S.S. and Suzaku observations of the Vela X pulsar wind nebula", Astron. Astrophys. 627, A100 (2019)

H. Abdalla et al., "Constraints on the emission region of 3C 279 during strong flares in 2014 and 2015 through VHE γ -ray observations with H.E.S.S.", Astron. Astrophys. 627, A159 (2019)

H. Abdalla et al., "The 2014 TeV γ -Ray Flare of Mrk 501 Seen with H.E.S.S.: Temporal and Spectral Constraints on Lorentz Invariance Violation", Astrophys. J. 870, 93 (2019)

N. Agafonova et al., "Measurement of the cosmic ray muon flux seasonal variation with the OPERA detector", J. Cosmol. Astropart. P. 1910, 003 (2019)

- N. Agafonova et al., "Final results on neutrino oscillation parameters from the OPERA experiment in the CNGS beam", *Phys. Rev. D* 100, 051301 (2019)
- F. Andrieu et al., "Démarche qualité pour des données de recherche robustes", *Techniques de l'Ingénieur*, SL 1 060 (2019)
- R. Arnold et al., "Detailed studies of ^{100}Mo two-neutrino double beta decay in NEMO-3", *Eur. Phys. J. C* 79, 440 (2019)
- P. Ascher et al., "Mass measurements of neutron-rich isotopes near $N = 20$ by in-trap decay with the ISOLTRAP spectrometer", *Phys. Rev. C* 100, 014304 (2019)
- M. Barberio et al., "Pigment darkening as case study of In-Air Plasma-Induced Luminescence", *Sci. Adv.* 5, eaar6228 (2019)
- O. Bouland and B. Jurado, "Revisiting fission-probability data using R-matrix Monte-Carlo simulations: application to Pu fissile isotopes over the 4 to 8 MeV excitation energy range", *Phys. Rev. C* 100, 064611 (2019)
- B. A. Brown, B. Blank, and J. Giovinazzo, "Hybrid model for two-proton radioactivity", *Phys. Rev. C* 100, 054332 (2019)
- N. Carjan and M. Rizea, "Structures in the energy distribution of the scission neutrons: finite neutron-number effect", *Phys. Rev. C* 99, 034613 (2019)
- A. Carmona et al., "SLC30A10 Mutation Involved in Parkinsonism Results in Manganese Accumulation within Nanovesicles of the Golgi Apparatus", *ACS Chem. Neurosci.* 10, 599 (2019)
- A. Carmona et al., "Mapping Chemical Elements and Iron Oxidation States in the Substantia Nigra of 6-Hydroxydopamine Lesioned Rats Using Correlative Immunohistochemistry With Proton and Synchrotron Micro-Analysis", *Front. Neurosci.* 13, 1014 (2019)
- A. Chatillon et al., "Experimental study of nuclear fission along the thorium isotopic chain: From asymmetric to symmetric fission", *Phys. Rev. C* 99, 054628 (2019)
- A. Compant La Fontaine et al., "Bremsstrahlung spectrum and photon dose from short-pulse high-intensity laser interaction on various metal targets", *Phys. Plasmas* 26, 113109 (2019)
- G. Coussot et al., "Photochemistry on the Space Station—Antibody Resistance to Space Conditions after Exposure Outside the International Space Station", *Astrobiol.* 19, 1053 (2019)
- G. Coussot et al., "Photochemistry on the Space Station—Aptamer Resistance to Space Conditions: Particles Exposure from Irradiation Facilities and Real Exposure Outside the International Space Station", *Astrobiol.* 19, 1063 (2019)
- S. Das et al., "Emerging chemical tools and techniques for tracking biological manganese", *Dalton Trans.* 48, 7047 (2019)
- S. Das et al., "Manganese Mapping Using a Fluorescent Mn $2+$ Sensor and Nanosynchrotron X-ray Fluorescence Reveals the Role of the Golgi Apparatus as a Manganese Storage Site", *Inorg. Chem.* 58, 13724 (2019)
- P. J. Davies et al., "Toward the limit of nuclear binding on the $N = Z$ line: Spectroscopy of ^{96}Cd ", *Phys. Rev. C* 99, 021302 (2019)
- Z. Francis et al., "A simulation study of gold nanoparticles localisation effects on radiation enhancement at the mitochondrion scale", *Phys. Medica* 67, 148 (2019)
- S. H. Frisbie et al., "Manganese levels in infant formula and young child nutritional beverages in the United States and France: Comparison to breast milk and regulations", *PLoS One* 14, e0223636 (2019)
- C. Gasparini et al., "Uranium carbide oxidation from 873 K to 1173 K", *Corrosion Science* 151, 44 (2019)
- J. Glorius et al., "Approaching the Gamow window with stored ions: Direct measurement of $^{124}\text{Xe}(p, \gamma)$ in the ESR storage ring", *Phys. Rev. Lett.* 122, 092701 (2019)
- L. Guillemot et al., "Timing of PSR J2055+3829, an eclipsing black widow pulsar discovered with the Nançay Radio Telescope", *Astron. Astrophys.* 629, A92 (2019)
- J. L. Henares et al., "Development of critical-density gas jet targets for laser-driven ion acceleration", *Rev. Sci. Instrum.* 90, 063302 (2019)
- K. Hickman-Lewis et al., "Mechanistic Morphogenesis of Organo-Sedimentary Structures Growing Under Geochemically Stressed Conditions: Keystone to Proving the Biogenicity of Some Archaean Stromatolites?", *Geosciences* 9, 359 (2019)
- R. Hodák et al., "Characterization and long-term performance of the Radon Trapping Facility operating at the Modane Underground Laboratory", *J. Phys. G-Nucl. Partic.* 46, 115105 (2019)
- D. Horlait et al., "Experimental determination of intragranular helium diffusion rates in boron carbide (B^4C)", *J. Nucl. Mater.* 527, 151834 (2019)
- S. Incerti et al., "Track structure simulations of proximity functions in liquid water using the Geant4-DNA toolkit", *J. Appl. Phys.* 125, 104301 (2019)
- K. R. Kean et al., "Validation of the multinucleon transfer method for the determination of the fission barrier height", *Phys. Rev. C* 100, 014611 (2019)
- H. de Kerret et al., "First Double Chooz Θ^{13} Measurements via Total Neutron Capture Detection", *Double Chooz Collaboration*, submitted to *Nature Physics* (2019)
- I. Kyriakou et al., "Influence of track structure and condensed history physics models of Geant4 to nanoscale electron transport in liquid water", *Phys. Medica* 58, 149 (2019)
- N. Lampe et al. (13 co-auteurs), "Reducing the ionizing radiation background does not significantly affect the evolution of *Escherichia coli* populations over 500 generations", *Scientific Reports, nature research* 9, 14891 (2019)
- V. Leblanc et al., "Microbial and Geochemical Investigation down to 2000 m Deep Triassic Rock (Meuse/Haute Marne, France)", *Geosciences* 9, 3 (2019)
- C. M. Z. Li et al., "A Geant4 simulation for three-dimensional proton imaging of microscopic samples", *Phys. Medica* 65, 172 (2019)
- R. Lica et al., "Normal and intruder configurations in ^{34}Si populated in the $\beta -$ decay of ^{34}Mg and ^{34}Al ", *Phys. Rev. C* 100, 034306 (2019)
- L. Liu et al., "Remote imaging of single cell 3D morphology with ultrafast coherent phonons and their resonance harmonics", *Sci. Rep.* 9, 6409 (2019)
- M.-Z. Liu et al., "Emergence of a complete heavy-quark spin symmetry multiplet: seven molecular pentaquarks in light of the latest LHCb analysis", *Phys. Rev. Lett.* 122, 242001 (2019)
- D. Lubos et al., "Improved Value for the Gamow-Teller Strength of the ^{100}Sn Beta Decay", *Phys. Rev. Lett.* 122, 222502 (2019)
- H. Makii et al., "Effects of the nuclear structure of fission fragments on the high-energy prompt fission γ -ray spectrum in $^{235}\text{U}(\text{nth}, \text{f})$ ", *Phys. Rev. C* 100, 044610 (2019)
- B. Mauss et al., "Commissioning of the Active TARget and Time Projection Chamber (ACTAR TPC)", *Nucl. Instrum. Meth. A* 940, 498 (2019)
- R. P. Mignani et al., "The first ultraviolet detection of the large magellanic cloud pulsar PSR B0540–69 and its multi-wavelength properties", *Astrophys. J.* 871, 246 (2019)
- H. Ndiyavala et al., "Probing the Pulsar Population of Terzan 5 via Spectral Modeling", *Astrophys. J.* 880, 53 (2019)
- N. M. Nor et al., "Consistency of two different approaches to determine the strength of a pairing residual interaction in the rare-earth region", *Phys. Rev. C* 99, 064306 (2019)
- S. Novak et al., "The in vivo effects of silver nanoparticles on terrestrial isopods, *Porcellio scaber*, depend on a dynamic interplay between shape, size and nanoparticle dissolution properties", *Analyst* 144, 488 (2019)
- S. Okada et al., "MPEXS-DNA, a new GPU-based Monte Carlo simulator for track structures and radiation chemistry at subcellular scale", *Med. Phys.* 46, 1483 (2019)
- J. Park et al., "New and comprehensive β - and $\beta\text{-}$ decay spectroscopy results in the vicinity of ^{100}Sn ", *Phys. Rev. C* 99, 034313 (2019)
- E. Paredes et al., "Isotopic variations of copper at the protein fraction level in neuronal human cells exposed in vitro to uranium", *Analyst* 144, 5928 (2019)

- D. Pérez-Loureiro et al., "Neutron-rich fragments produced by in-flight fission of ^{238}U ", Phys. Rev. C 99, 054606 (2019)
- V. D. Petković et al., "Biological Outcomes of γ -radiation Induced DNA Damages in Breast and Lung Cancer Cells Pretreated with Free Radical Scavengers", Int. J. Radiat. Biol. 95, 274 (2019)
- D. Peukert et al., "Validation and investigation of reactive species yields of Geant4-DNA chemistry models", Med. Phys. 46, 983 (2019)
- P. Puyuelo-Valdes et al., "Proton acceleration by collisionless shocks using a supersonic H2 gas-jet target and high-power infrared laser pulses", Phys. Plasmas 26, 123109 (2019)
- D. Ramos et al., "First Direct Measurement of Isotopic Fission-Fragment Yields of ^{239}U ", Phys. Rev. Lett. 123, 092503 (2019)
- M. Saltel et al., "Paleoclimate variations and impact on groundwater recharge in multi-layer aquifer systems using a multi-tracer approach (northern Aquitaine basin, France)", Hydrogeol. J. 27, 1439 (2019)
- D. Sakata et al., "Evaluation of early radiation DNA damage in a fractal cell nucleus model using Geant4-DNA", Phys. Medica 62, 152 (2019)
- D. Sakata et al., "Electron track structure simulations in a gold nanoparticle using Geant4DNA", Phys. Medica 63, 98 (2019)
- M. Saltel et al., "Paleoclimate variations and impact on groundwater recharge in multi-layer aquifer systems using a multi-tracer approach (northern Aquitaine basin, France)", Hydrogeol. J. 27, 1439 (2019)
- R. P. Sánchez et al., "Experimental set-up for the simultaneous measurement of fission and γ -emission probabilities induced by transfer or inelastic-scattering reactions", Nucl. Instrum. Meth. A 933, 63 (2019)
- J. Schuemann et al., "A New Standard DNA Damage (SDD) Data Format", Radiat. Res. 191, 76 (2019).
- J. Schuemann et al., "TOPAS-nBio: An Extension to the TOPAS Simulation Toolkit for Cellular and Sub-cellular Radiobiology", Radiat. Res. 191, 125 (2019)
- W.-G. Shin et al., "Evaluation of the influence of physical and chemical parameters on water radiolysis simulations under MeV electron irradiation using Geant4-DNA", J. Appl. Phys. 126, 114301 (2019)
- N. A. Smirnova et al., "Effective interactions in the sd shell", Phys. Rev. C 100, 054329 (2019)
- D. A. Smith et al., "Searching a Thousand Radio Pulsars for Gamma-Ray Emission", Astrophys. J. 871, 78 (2019)
- N. Tang et al., "Assessment of Radio-Induced Damage in Endothelial Cells Irradiated with 40 kVp, 220 kVp, and 4 MV X-rays by Means of Micro and Nanodosimetric Calculations", Int. J. Mol. Sci. 20, 6204 (2019)
- N. Tang et al., "Influence of chromatin compaction on simulated early radiation-induced DNA damage using Geant4-DNA", Med. Phys. 46, 1501 (2019).
- E. Torfeh et al., "Monte-Carlo dosimetry and real-time imaging of targeted irradiation consequences in 2-cell stage *Caenorhabditis elegans* embryo", Sci. Rep. 9, 10568 (2019)
- I. Tsekhanovich et al., "Observation of the competing fission modes in ^{178}Pt ", Phys. Lett. B 790, 583 (2019)
- C. Velte et al., "High-resolution and low-background ^{163}Ho spectrum: interpretation of the resonance tails", Eur. Phys. J. C 79, 1026 (2019)
- M. Versteegen et al., "Role of the pre-plasma on electron beam currents from a biased laserplasma", Rev. Sci. Instrum. 90, 053306 (2019)
- C. Vidaud et al., "Deciphering the uranium target proteins in human dopaminergic SH-SY 5 Y cells", Arch. Toxicol. 93, 2141 (2019)
- K. Wimmer et al., "Discovery of ^{68}Br in secondary reactions of radioactive beams", Phys. Lett. B 795, 266 (2019)
- A. Zabihi et al., "Computational approach to determine the relative biological effectiveness of fast neutrons using the Geant4-DNA toolkit and a DNA atomic model from the Protein Data Bank", Phys. Rev. E 99, 052404 (2019)
- A. Zabihi et al., "Determination of fast neutron RBE using a fully mechanistic computational model", Appl. Radiat. Isot. 156, 108952 (2019)



©Piscilla DU PREEZ from Unsplash

COMMUNICATIONS ÉCRITES EN CONFÉRENCES ET WORKSHOPS

2015

J. Apostolakis et al., **"Progress in Geant4 electromagnetic physics modelling and validation"** in 21st International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP2015), J. Phys.: Conf. Ser. 664, p. 072021 (2015)

P. Barberet et al., **"Development and applications of STIM- and PIXE-tomography: A review"**, 14th International Conference on Particle Induced X-ray Emission (PIXE 2015), Somerset West, Afrique du Sud, 25 février - 3 mars 2015

B. Blank et al., **"Super-Allowed β Decay of ^{23}Mg Studied with a High-Precision Germanium Detector"** in 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science, JPS Conf. Proc. 6, p. 030066 (2015)

R. J. Britto, S. Razzaque, and B. Lott, **"Spectral Studies of Flaring FSRQs at GeV Energies Using Pass 8 Fermi-LAT Data"** in 5th International Fermi Symposium (2015)

C. Cerna, B. Soulé, and F. Perrot, **"Radon emanation based material measurement and selection for the SuperNEMO double beta experiment"** in 5th Topical Workshop on Low Radioactivity Techniques, AIP Conf. Proc. 1672, p. 050002 (2015)

E. Chauveau (on behalf of Double Chooz collaboration), **"Status of Double Chooz experiment"**, EPS-HEP 2015, Vienna, Austria, 22-29 July 2015, PoS, EPS-HEP2015, 062 (2015)

H. Cottin et al., **"Photochemical studies in low Earth orbit for organic compounds related to small bodies, Titan and Mars. Current and future facilities"** in Experimental astrochemistry: from ground-based to space-borne laboratories, Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège 84, p. 60 (2015)

A. Dastgheibi Fard et al., **"Background reduction of a spherical gaseous detector"** in 5th Topical Workshop on Low Radioactivity Techniques (LRT 2015), 18-20 March 2015, Seattle, WA, USA, AIP Conf. Proc. 1672 1, 070003 (2015)

S. Franchoo et al., **"Single-particle strength in neutron-rich ^{71}Cu from the (d, ^3He) proton pick-up reaction"** in 11th International Spring Seminar on Nuclear Physics: Shell Model and Nuclear Structure, J. Phys. Conf. Ser. 580, p. 012012 (2015)

Y. Fujita et al., **"Gamow-Teller Excitations Studied by Weak and Strong Interactions"** in 54th Cracow School of Theoretical Physics, Acta Phys. Pol. B 46, p. 657 (2015)

T. Gorbinet et al., **"A Sample of the Results of the First SOFIA Experiment"** in Scientific Workshop on Nuclear Fission dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays, Phys. Procedia 64, p. 101 (2015)

R. Hodák et al., **"Improvement of the energy resolution of the scintillating detectors for the low background measurement"** in 5th Topical Workshop on Low Radioactivity Techniques (LRT 2015), AIP Conf. Proc. 1672, p. 130003 (2015)

S. Incerti et al., **"De l'ionisation aux processus primaires: l'approche Geant4-DNA"**, Action Nationale de Formation "Processus chimiques élémentaires induits par les rayonnements ionisants générant la corrosion, l'altération, le vieillissement et le stress oxydant", Fédération de Chimie Physique de Paris Saclay, Fréjus, France, 16-19 septembre 2015

S. Incerti et al., **"Geant4-DNA: past, present and future"**, International Symposium "From track structure to clinical outcomes and reverse", McGill University, Montreal, Canada, 30-31 mars 2015

S. Kisiov et al., **"Time of Flight Measurements for Neutrons Produced in Reactions Driven by Laser-Target Interactions at Petawatt level"** in International Conference on Laser Applications at Accelerators, Phys. Procedia 77, p. 29 (2015)

M.-H. Koh et al., **"Fission Barriers of Two Odd-Neutron Heavy Nuclei"** in International Workshop "Shapes and Dynamics of Atomic Nuclei: Contemporary Aspects", Bulg. J. Phys. 42, p. 362 (2015)

A. T. Laffoley et al., **"High-Precision Half-Life Measurements for the Superaligned Fermi β^+ Emitters ^{14}O and ^{18}Ne "** in 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science, JPS Conf. Proc. 6, p. 020032 (2015)

R. Lică et al., **"Properties of low-lying intruder states in ^{34}Al and ^{34}Si populated in the beta decay of ^{34}Mg "** in Carpathian Summer School of Physics 2014, AIP Conf. Proc. 1645, p. 363 (2015)

P. Loaiza et al., **"Obelix, a new low-background HPGe at Modane Underground Laboratory"** in 5th Topical Workshop on Low Radioactivity Techniques (LRT 2015), AIP Conf. Proc. 1672, p. 130002 (2015)

P. Marini et al., **"Strengths and limitations of the surrogate reaction method to access neutron induced cross sections of actinides"** in 14th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, CERN-Proceedings 2015-001 (2015)

F. Negoita et al., **"Perspectives for neutron and gamma spectroscopy in high power laser driven experiments at ELI-NP"** in Carpathian Summer School of Physics 2014, AIP Conf. Proc. 1645, p. 228 (2015)

S. E. Orrigo et al., **" β -delayed γ -proton decay in ^{56}Zn : analysis of the charged-particle spectrum"** in 54th Cracow School of Theoretical Physics, Acta Phys. Pol. B 46, p. 709 (2015)

A. J. Pollitt et al., **"Measurements of γ -ray Energy and Multiplicity from $^{235}\text{U}(n_{\text{thermal}})$ using STEFF"** in 15th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, EPJ Web Conf. 93, p. 02018 (2015)

F. Rotaru et al., **"Properties of intruder states in ^{34}Al and ^{34}Si "** in 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science, JPS Conf. Proc. 6, p. 020006 (2015)

B. Rubio et al., **"Competition between β -delayed proton and β -delayed γ decay of the exotic $T_z = -2$ nucleus ^{56}Zn and fragmentation of the IAS"** in 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science, JPS Conf. Proc. 6, p. 020048 (2015)

E. Rukhadze et al., **"Investigations of 2β decay of ^{106}Cd and ^{58}Ni with HPGe spectrometer OBELIX"** in 5th Topical Workshop on Low Radioactivity Techniques (LRT 2015), AIP Conf. Proc. 1672, p. 130005 (2015)

N. I. Rukhadze et al., **"Double electron capture of ^{106}Cd in the TGV-2 experiment"** in 5th Topical Workshop on Low Radioactivity Techniques (LRT 2015), 18-20 March 2015, Seattle, WA, USA, AIP Conf. Proc. 1686, 020020 (2015)

N. I. Rukhadze et al., **"Double electron capture of ^{106}Cd in the TGV-2 experiment"** in Matrix Elements for the Double-beta-decay EXperiments (MEDEX'15), AIP Conf. Proc. 1686, p. 020020 (2015)

N. I. Rukhadze et al., **"Search for double beta decay of ^{106}Cd in the TGV-2 experiment"** in 14th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2015), Torino, Italy, 7-11 September 2015, J. Phys. Conf. Ser. 718 6, 062049 (2015)

K.-H. Schmidt and B. Jurado, **"General Laws of Quantum and Statistical Mechanics Governing Fission"**, Nuclear Physics: Present and Future, W. Greiner ed., pp. 121-130 (Springer, 2015)

2016

P. Barberet et al., **"Diamond-based thin detectors for radiobiological applications of charged-particle microbeams"**, 5th ADAMAS Workshop, Darmstadt, Germany, 2016

P. Barberet et al., **"Single particle diamond thin detector based on secondary electron emission for radiobiological applications"**, 15th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Lanzhou, China, 2016

A. Chatillon et al., **"Accurate measurements of fission-fragment yields in $^{234,235,236,238}\text{U}$ (γ, f) with the SOFIA set-up"** in 4th International Workshop on Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications, EPJ Web Conf. 111, p. 08001 (2016)

M. Dunlop et al., **"High-precision Half-life And Branching Ratio Measurements For Superalloyed β^+ Emitters At TRIUMF-ISAC"** in 26th International Nuclear Physics Conference, PoS INPC 2016, p. 167 (2016)

Y. Fujita et al., **"The $T = \pm 1 \rightarrow 0$ and $\pm 2 \rightarrow \pm 1$ Mirror Gamow-Teller Transitions in pf shell Nuclei"** in 34th Mazurian Lakes Conference on Physics, Acta Phys. Pol. B 47, p. 867 (2016)

D. Gasparrini et al., **"The 3rd Catalog of AGN Detected by the Fermi LAT"** in 34th International Cosmic Ray Conference, PoS 236, p. 879 (2016)

L. Grente et al., **"The SOFIA experiment: Measurement of ^{236}U fission fragment yields in inverse kinematics"** in 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, EPJ Web Conf. 122, p. 01006 (2016)

S. Incerti et al., **"A mechanistic approach for the modeling of biological effects of ionizing radiation: the Geant4-DNA project"**, 3rd Congress of the Frontier Research and Development Committee on "Multi-disciplinary Research on Effects of Radiation", Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), Kyoto University, Kyoto, Japan, 16 octobre 2016

S. Incerti et al., **"The Geant4-DNA project: status and perspectives"**, 1st Young Researcher Workshop of the French Society of Medical Physics (SFPMP), Luz, France, 21-24 septembre 2016

S. Incerti et al., **"Monte Carlo simulation of early biological damage induced by ionising radiation at the DNA scale: overview of the Geant4-DNA project"**, 6th International Conference on Contemporary Physics (ICCP-VI) & JINR Days in Mongolia/60th anniversary of JINR, Dubna, Russia, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolie, 6-10 juin 2016

S. Incerti et al., **"Geant4-DNA: present and Future"**, 3rd Geant4 Australian School and Monte Carlo Workshop for radiotherapy, imaging and radiation protection, Wollongong U., Australie, 26-30 avril 2016

N. Lampe et al., **"Background study of absorbed dose in biological experiments at the Modane Underground Laboratory"** in 32èmes journées des Laboratoires Associés de Radiophysiques et de Dosimétrie, L.A.R.D. 2015, EPJ Web Conf. 124, p. 00006 (2016)

P. Marini et al., **"Development of a gaseous proton-recoil detector for fission cross section measurements below 1 MeV neutron energy"** in 4th International Workshop on Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications, EPJ Web Conf. 111, p. 11001 (2016)

P. Marini et al., **"First simultaneous measurement of fission and gamma probabilities of ^{237}U and ^{239}Np via surrogate reactions"** in 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, EPJ Web Conf. 122, p. 12004 (2016)

F. Negoita et al., **"Laser Driven Nuclear Physics at ELI-NP"**, in Rom. Rep. in Phys. 68, Supplement, S37 (2016)

S. E. Orrigo et al., **"Competition of β -delayed protons and β -delayed γ rays in ^{64}Zn and the exotic β -delayed γ -proton decay"** in 12th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, EPJ Web Conf. 117, p. 06019 (2016)

I. Oya et al., **"HESS J1641-463, a very hard spectrum TeV gamma-ray source in the Galactic plane"** in 34th International Cosmic Ray Conference, PoS 236, p. 834 (2016)

F. Perrot, **"Status of SuperNEMO demonstrator"** in 38th International Conference on High Energy Physics, PoS 2016, p. 499 (2016)

G. Pühlhofer et al., **"Search for new supernova remnant shells in the Galactic plane with H.E.S.S."** in 34th International Cosmic Ray Conference, PoS 236, p. 886 (2016)

X. Raymond et al., **"Electron Source from a Laser Plasma Expanding in an Electric Field"** in 43rd EPS Conference on Plasma Physics, ECA Vol. 40A, p. O2J304 (2016)

R. Reifarh et al., **"Nuclear astrophysics with radioactive ions at FAIR"** in 6th Nuclear Physics in Astrophysics and 26th International Nuclear Physics Divisional Conference of the European Physical Society, J. Phys. Conf. Ser. 665, p. 012044 (2016)

N. I. Rukhadze et al., **"Search for double beta decay of ^{106}Cd in the TGV-2 experiment"** in 14th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP 2015), J. Phys. Conf. Ser. 718, p. 062049 (2016)

B. G. Trist et al., **"SOD1 aggregation: A pathological link between Parkinson's disease and amyotrophic lateral sclerosis ?"** in 2016 International Congress of the International Parkinson and Movement Disorder Society, Mov. Disord. 31, p. S241 (2016)

M. Versteegen et al., **"Effective photoexcitation cross section of ^{115}In (γ, γ') ^{115}mIn from photoactivation data"** in 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, EPJ Web Conf. 122, p. 03001 (2016)

2017

P. Agnes et al. (The DarkSide Collaboration), **"Status and perspective of the DarkSide experiment at LNGS"** in Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste - La Thuile 2017, Nuovo Cimento C 40, p. 164 (2017)

M. Bacak et al., **"A compact multi-plate fission chamber for the simultaneous measurement of ^{233}U capture and fission cross-sections"** in ND 2016 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 03027 (2017)

G. Ballerini et al., **"Longitudinally segmented shashlik calorimeters with SiPM embedded readout"** in 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), p. 1 (2017)

B. R. Barrett et al., **"Microscopic Shell Model Calculations for sd-Shell Nuclei"** in 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, JPS Conf. Proc. 14, p. 021006 (2017)

S. Bernhard, A. Balzer, and F. Brun, **"Sensitivity and performance simulations for transient phenomena in the H.E.S.S. analysis framework"** in 6th International Symposium on HighEnergy Gamma-Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. 1792, p. 070004 (2017)

P. Bordas et al., **"Observations of Binary Systems with the H.E.S.S. Telescopes"** in 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. 1792, p. 040017 (2017)

O. Bouland and B. Jurado, **"Monte Carlo simulation of γ and fission transfer-induced probabilities using extended R-matrix theory: Application to the ^{237}U system"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 04023 (2017)

F. Brun et al., **"The Fermi-LAT and H.E.S.S. views of the supernova remnant W49B"** in 10th Cosmic Ray International Seminar, Nucl. Part. Phys. Proc. 291-293, p. 30 (2017)

V. B. Brudanin et al., **"Investigation of double beta decay of ^{58}Ni with the Obelix spectrometer"** in Matrix Elements for the Double-beta-decay EXperiments (MEDEX'17), AIP Conf. Proc. 1894, p. 020020 (2017)

M. Capasso et al., **"Search for new supernova remnant shells in the Galactic Plane with H.E.S.S."** in 15th Incontri di Fisica delle Alte Energie, Nuovo Cimento C 40, p. 67 (2017)

- M. Capasso et al., **"The TeV supernova remnant shell HESS J1731-347 and its surroundings"** in 6th International Symposium on High-Energy Gamma- Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. 1792, p. 040026 (2017)
- M. Comet et al., **"Analysis of the X-ray emission spectra of copper, germanium and rubidium plasmas produced at the Phelix laser facility"** in 19th International Conference on Atomic Processes in Plasmas, AIP Conf. Proc. 1811, p. 070001 (2017)
- A. Donath et al., **"The H.E.S.S. galactic plane survey"** in 6th International Symposium on High-Energy Gamma- Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. 1792, p. 040001 (2017)
- G. Galati et al., **"More results from the OPERA experiment"**, Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, La Thuile 2017, 5-11 March 2017, La Thuile, Italy, Nuovo Cimento C 40, 5, 160 (2017)
- B. Geslot et al., **"Americium-241 integral radiative capture cross section in over-moderated neutron spectrum from pile oscillator measurements in the Minerve reactor"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 06016 (2017)
- T. Goigoux et al., **"Two-proton radioactivity of ^{67}Kr "** in 8th International Symposium on Exotic Nuclei, p. 227 (2017)
- A. Huber, **"Development of an optical simulation for the SuperNEMO calorimeter"** in 27th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, J. Phys. Conf. Ser. 888, p. 012250 (2017)
- S. Incerti et al., **"Monte Carlo simulation of early biological damage induced by ionizing radiation at the DNA scale: overview of the Geant4-DNA project"**, International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics 2017 (MMCP2017), JINR, Dubna, Russie, 3-7 juillet 2017
- V. Ivantchenko and S. Incerti, **"Geant4 Standard and Low Energy electromagnetic libraries"** in International Symposium "Advances in Dark Matter and Particle Physics 2016", EPJ Web Conf. 142, p. 01016 (2017)
- B. Jurado et al., **"Investigation of the surrogate-reaction method via the simultaneous measurement of gamma-emission and fission probabilities"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 11006 (2017)
- Y. H. Lam and N. A. Smirnova, **"Theoretical Description Of Beta-delayed Proton Emission Of Proton-rich sd- And pf-Shell Nuclei"** in 26th International Nuclear Physics Conference, PoS INPC 2016, p. 042 (2017)
- X. Ledoux et al., **"The neutrons for science facility at SPIRAL-2"** in ND 2016 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 03003 (2017)
- P. Loaiza et al., **"The BiPo3 detector"**, Applied Radiation and Isotopes 123, 54 (2017)
- R. López-Coto, V. Marandon, and F. Brun, **"Morphological and spectral measurements of 2HWC J1928+177 with HAWC and H.E.S.S."** in 35th International Cosmic Ray Conference (2017)
- M. Macko, **"Study of reconstruction precision of double beta decay vertex for SuperNEMO demonstrator"** in Matrix Elements for the Double-beta-decay Experiments, AIP Conf. Proc. 1894, p. 020014 (2017)
- H. Makii et al., **"Measurement of high-energy prompt gamma-rays from neutron induced fission of U-235"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 04036 (2017)
- V. Marandon et al., **"Observation of the W49B supernova remnant with Fermi-LAT and H.E.S.S."** in 6th International Symposium on High-Energy Gamma- Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. 1792, p. 040033 (2017)
- P. Marini et al., **"Development of a gaseous recoil-proton detector for neutron flux measurements between 0.2 and 2 MeV neutron energy"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 03015 (2017)
- C. Marquet, **"The SuperNEMO calorimeter"** in 27th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, J. Phys. Conf. Ser. 888, p. 012227 (2017)
- C. Marquet, **"The SuperNEMO calorimeter"** in 38th International Conference on High Energy Physics, PoS 2016, p. 1037 (2017)
- L. Mathieu et al., **"Accurate measurement of a fission chamber efficiency using the prompt fission neutron method"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 03016 (2017)
- K. Nishio et al., **"Experimental fission study using multi-nucleon transfer reactions"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 04009 (2017)
- K. Nishio et al., **"Study of Fission Using Multi-Nucleon Transfer Reactions"** in 6th International Conference on Fission and Properties of Neutron Rich Nuclei, p. 590 (2017)
- P. Quentin and J. Bartel, **"Coupling of the Collective Rotation and Pairing Correlation Modes in Well-Deformed Even-Even Nuclei"** in International Workshop "Shapes and Dynamics of Atomic Nuclei: Contemporary Aspects", Bulg. J. Phys. 44, p. 326 (2017)
- R. Reifarh et al., **"Reactor neutrons in nuclear astrophysics"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 01003 (2017)
- R. Reifarh et al., **"A Free-Neutron Target for Nuclear Reaction Studies"** in 6th International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei, p. 472 (2017)
- B. Rubio et al., **"Beta Decay Studies of Proton Rich Nuclei, an Important Ingredient for rp Process Calculations"** in 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos, JPS Conf. Proc. 14, p. 010510 (2017)
- K.-H. Schmidt, B. Jurado, and C. Schmitt, **"General description of fission observables: The GEF code"** in ND2016: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, EPJ Web Conf. 146, p. 04001 (2017)
- F. Schüssler et al., **"Limits on the TeV gamma-ray afterglow of fast radio bursts with H.E.S.S."** in 6th International Symposium on High-Energy Gamma- Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. 1792, p. 060013 (2017)
- F. Schüssler et al., **"The H.E.S.S. multi-messenger program: Searches for TeV gamma-ray emission associated with high-energy neutrinos"** in 6th International Symposium on HighEnergy Gamma- Ray Astronomy, AIP Conf. Proc. 1792, p. 060006 (2017)
- F. Schüssler et al., **"H.E.S.S. observations following multi-messenger alerts in real-time"** in 35th International Cosmic Ray Conference, ICRC2017, p. 653 (2017)
- D. A. Smith et al., **"Gamma-ray pulsars with Fermi"** in 11th INTEGRAL Conference Gamma-Ray Astrophysics in Multi-Wavelength Perspective, PoS 285, p. 035 (2017)
- J. Taieb et al., **"Studies on Fission with Aladin"** in 6th International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei, p. 339 (2017)
- O. B. Tarasov et al., **"Study of fusion-fission in inverse kinematics with a fragment separator"** in 8th International Symposium on Exotic Nuclei, p. 366 (2017)
- J. N. Wilson et al., **"Production and Study of Neutron-rich Nuclei Using the LICORNE Directional Neutron Source"** in Zakopane Conference on Nuclear Physics, Acta Phys. Pol. B 48, p. 395 (2017)
- L. Xayavong et al., **"Shell-model calculation of isospin-symmetry breaking correction to superallowed Fermi beta-decay"** in 23rd Nuclear Physics Workshop 'Marie and Pierre Curie' on Essential Problems in Nuclear Physics, Acta Phys. Pol. Supp. 10, p. 285 (2017)

2018

- L. Audouin et al., **"High-precision measurement of isotopic fission yields of ^{236}U "** in 6th Workshop on Nuclear Fission and Spectroscopy of Neutron-Rich Nuclei (FISSION 2017), EPJ Web Conf. 193, p. 02001 (2018)
- C. D. R. Azevedo et al., **"TRITIUM - A Real-Time Tritium Monitor System for Water Quality Surveillance"** in IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (10-17 November 2018), Sydney, Australia
- G. Ballerini et al., **"Status of the ENUBET project"** in Conference on Neutrino and Nuclear Physics (CNNP2017), J. Phys. Conf. Ser. 1056, p. 012047 (2018)
- P. Barbert et al., **"DéTECTEURS DIAMANT CVD MONOCRISTAL MEMBRANAIRES POUR LES MICROFAISCEAUX D'IONS: CARACTÉRISATIONS AVANCÉES ET APPLICATIONS"**. 7ème rencontre Ion Beam Applications France (IBAF), Nouan Le Fuzelier, France, 2018
- P. Barbert et al., **"Ultra-Thin Diamond Detectors for Cell Micro-Irradiation Experiments"**. 16th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications, Surrey, UK, 2018
- R. Breier et al., **"Environmental radionuclides as contaminants of HPGe gamma-ray spectrometers: Monte Carlo simulations for Modane underground laboratory"** in International Conference on Environmental Radioactivity (ENVIRA2017), J. Environ. Radioact. 190-191, p. 134 (2018)
- V. B. Brudanan et al., **"Investigation of double beta decay of ^{58}Ni with the Obelix spectrometer"**, Matrix Elements for the Double-beta-decay EXperiments (MEDEX'17), Prague, Czech Republic, 29 May – 2 June 2017, AIP Conf. Proc. 1894, 020020 (2018)
- M. Capasso et al., **"Search for new supernova remnant shells in the Galactic Plane with H.E.S.S."** in 15th Incontri di Fisica delle Alte Energie, Nuovo Cimento C 40, p. 67 (2018)
- A. Coffani et al., **"A narrow band neutrino beam with high precision flux measurements"** in Prospects in Neutrino Physics, p. 134 arXiv:1804.03248 (2018)
- G. Devès et al., **"Single Cell in Situ Detection and Quantification of Metal Oxide Nanoparticles Using Multimodal Correlative Microscopy"**. Orlando, Florida, USA. Feb 26th - March 1st, 2018
- F. Farget et al., **"Fission studies at VAMOS"** in 6th Workshop on Nuclear Fission and Spectroscopy of Neutron-Rich Nuclei (FISSION), EPJ Web Conf. 193 (2018)
- J. L. Henares et al., **"Optimization of critical-density gas jet targets for laser ion acceleration in the collisionless shockwave acceleration regime"** in Targetry for High Repetition Rate Laser Driven Sources (Targ3), J. Phys. Conf. Ser. 1079, p. 012004 (2018)
- S. Incerti, V. Ivanchenko, and M. Novak, **"Recent progress of Geant4 electromagnetic physics for calorimeter simulation"** in CHEF 2017, J. Instrum. 13, p. C02054 (2018)
- S. Incerti et al., **"Monte Carlo simulation of early biological damage induced by ionizing radiation at the DNA scale: overview of the Geant4-DNA project"**, World Congress on Medical Physics & Biomedical Engineering (IUPEM2018), Prague, République Tchèque, 3-8 juin 2018
- S. Incerti et al., **"Track structure simulations with Geant4-DNA"**, World Congress on Medical Physics & Biomedical Engineering, Prague, République Tchèque, 3-8 juin 2018
- Y. H. Lam and N. A. Smirnova, **"Isospin Non-Conservation in Shell Model Approach and Applications"** in 16th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics, EPJ Web Conf. 178, p. 05006 (2018)
- X. Ledoux et al., **"The Neutrons for Science Facility at SPIRAL-2"** in 13th Symposium on Neutron and Ion Dosimetry, Radiat. Prot. Dosim. 180, p. 115 (2018)
- A. Longhin et al., **"High precision measurements of neutrino fluxes with ENUBET"** in 17th International Workshop on Neutrino Telescopes (Neutel 2017), PoS 307, p. 050 (2018)
- R. Lozeva et al., **"New nuclear structure data after fission: The g.s. of ^{136}Sb "** in 6th Workshop on Nuclear Fission and Spectroscopy of Neutron-Rich Nuclei, EPJ Web Conf. 193, p. 05005 (2018)
- C. Michelet et al., **"A Geant4 model for three-dimensional proton imaging of microscopic samples"**, Third Geant4 International User Conference at the Physics-Medicine-Biology frontier, Bordeaux, 29-31 octobre 2018
- K. Nishio et al., **"Fission study using multi-nucleon transfer reaction at JAEA tandem"** in 6th Workshop on Nuclear Fission and Spectroscopy of Neutron-Rich Nuclei (FISSION 2017), EPJ Web Conf. 193 (2018)
- K. Nishio et al., **"Study of fission using multi-nucleon transfer reactions"** in Scientific Workshop on Nuclear Fission dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays, EPJ Web Conf. 169, p. 00013 (2018)
- S. E. Orrigo et al., **"Structure of proton-rich nuclei via mirror β decay and charge exchange reactions"** in Conference on Neutrino and Nuclear Physics, J. Phys. Conf. Ser. 1056, p. 012041 (2018)
- P. P. Povinec et al., **"Ultra-sensitive radioanalytical technologies for underground physics experiments"** in International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC XI), J. Radioanal. Nucl. Chem. 318, p. 677 (2018)
- F. Pupilli et al., **"ENUBET: High Precision Neutrino Flux Measurements in Conventional Neutrino Beams"** in 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact17), PoS 295, p. 087 (2018)
- F. Pupilli et al., **"Positron identification in the ENUBET instrumented decay tunnel"** in 17th International Workshop on Neutrino Telescopes (Neutel 2017), PoS 307, p. 078 (2018)
- F. Pupilli et al., **"The ENUBET narrow band neutrino beam"**, Neutrino Oscillation Workshop (NOW2018), 9-16 September 2018, Ostuni, Brindisi, Italy, PoS (NOW2018) 030 (2018)
- C. Schmitt, K.-H. Schmidt, and B. Jurado, **"The GEF model: Assessment of fission-fragment properties over an extended region"** in Scientific Workshop on Nuclear Fission Dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays (Theory-4), EPJ Web Conf. 169, p. 00022 (2018)
- N. A. Smirnova and L. Xayavong, **"Isospin-symmetry breaking correction to superallowed $0^+ \rightarrow 0^+$ beta decay"** in International Conference "Nuclear Theory in the Supercomputing Era 2018" (NTSE-2018) (2018)
- M. Tenti et al., **"The ENUBET narrow band neutrino beam"** in Prospects in Neutrino Physics (NuPhys2018), p. 164 (2018)
- F. Terranova et al. (45 co-auteurs), **"The ENUBET project: high precision neutrino flux measurement in conventional neutrino beams"**, 2017 European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPSHEP 2017), 5-12 July 2017, Venice, Italy, PoS 314, 138 (2018)
- J. N. Wilson et al., **"Studies of fission fragment yields via high-resolution γ -ray spectroscopy"** in Scientific Workshop on Nuclear Fission dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays, EPJ Web Conf. 169, p. 00030 (2018)
- L. Xayavong and N. Smirnova, **"Nuclear Structure Correction to Superallowed $0^+ \rightarrow 0^+ \beta$ decay Revisited"** in IIRC Symposium on Perspectives of the Physics of Nuclear Structure, JPS Conf. Proc. 23, p. 012035 (2018)

2019

V. Araujo-Escalona et al., **"Scalar current limit from the beta-neutrino correlation: the WISARD experiment"** in 42nd Symposium on Nuclear Physics, Coyoco, Mexico, J. Phys. Conf. Ser. 1308, p. 012003 (2019)

M. Bacak et al., **"Preliminary results on the ^{233}U capture cross section and alpha ratio measured at nTOF (CERN) with the fission tagging technique"** in 5th International Workshop On Nuclear Data Evaluation for Reactor Applications, EPJ Web Conf. 211, p. 03007 (2019)

- G. Ballerini et al., "Shashlik calorimeters for the ENUBET tagged neutrino beam" in 18th International Conference on Calorimetry in Particle Physics (CALOR 2018), J. Phys. Conf. Ser. 1162, p. 012032 (2019)
- P. Barberet et al., "Using μ -PIXE for biological applications at the single cell level. 16th International Conference on Particle Induced X-ray Emission", Caldas da Rainha, Portugal, 2019
- L. Bonneau et al., "K-Isomeric States in Heavy, Well-Deformed Nuclei within a Skyrme-Hartree-Fock-BCS Approach" in SDANCA19, Bulg. J. Phys. 46, p. 366 (2019)
- G. Brunetti et al., "Status of the ENUBET project" in 20th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact18), PoS 341, p. 122 (2019)
- G. Brunetti et al., "The ENUBET Beamline" in Prospects in Neutrino Physics (2019)
- C. Cerna, "The Jiangmen Underground Neutrino Observatory", 15th Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 18-22 February 2019, Nucl. Instr. and Method A, Vol. 958 (2019)
- P. Delahaye et al., "New exotic beams from the SPIRAL 1 upgrade" in 18th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics, Geneva, Switzerland (2019)
- T. Goigoux et al., " ^{67}Kr Two-proton Radioactivity: Results and Theoretical Interpretations" in Zakopane Conference on Nuclear Physics, Acta Phys. Pol. B 50, p. 399 (2019)
- S. Incerti et al., "Track structure simulations with Geant4-DNA", 2019 Fisica Computacional week of the Gleb Wataghin Institute of Physics, Campinas University, Brésil, 18-22 février 2019
- S. Incerti et al., "Overview of the Geant4-DNA software for early DNA damage prediction", 7th International Conference on Radiation in Various Fields of Research, Herceg Novi, Montenegro, 10-14 juin 2019
- S. Incerti et al., "Overview of the Geant4-DNA software for early DNA damage prediction", 26th International Symposium on Ion-Atom Collisions, Paris, France, 20-22 juillet 2019
- S. Incerti et al., "Geant4-DNA: recent developments", 4th Geant4 Australian School and Monte Carlo Workshop for radiotherapy, imaging and radiation protection, Wollongong U., Australie, 2-8 décembre 2019
- Incerti, S. et al., "Monte Carlo simulation of early biological damage induced by ionizing radiation at the DNA scale: overview of the Geant4-DNA project", 2019 Fisica Computacional week of the Gleb Wataghin Institute of Physics, Campinas University, Brésil, 18-22 février 2019
- N. Jovančević et al., "Spectroscopy of Neutron Induced Reactions with the ν -ball Spectrometer" in Zakopane Conference on Nuclear Physics, Acta Phys. Pol. B 50, p. 297 (2019)
- V. Malard et al., "Toxicity mechanisms of cobalt oxide particles ($\text{Co}_3\text{O}_4\text{P}$) on human lung cells: impact of solubilization" in The 12th International Conference on the Health Effects of Incorporated Radionuclides (HEIR 2018), BIO Web Conf. 14, p. 05010 (2019)
- G. Mantovani et al., "Study of High-Energy Fission in Inverse Kinematics" in 4th International Conference on Nuclear Structure and Dynamics, EPJ Web Conf. 223, p. 01037 (2019)
- A. Mares, M. H. Grondin, and M. Lemoine-Goumard, "Efficient particle acceleration from HESS J1640-465 and the PeVatron candidate HESS J1641-463" in 36th International Cosmic Ray Conference, PoS 358, p. 582 (2019)
- P. Marini et al., "Development of a gaseous proton-recoil detector for neutron flux measurements between 0.2 and 2 MeV neutron energy" in WONDER-2018 – 5th International Workshop on Nuclear Data Evaluation for Reactor applications, EPJ Web Conf. 211, p. 03010 (2019)
- A. Mereaglia, "A new neutrinoless double beta decay experiment: R2D2" in 9th Symposium on Large TPCs for Low-Energy Rare Event Detection (TPC2018), J. Phys.: Conf. Ser. 1312, p. 012002 (2019)
- M. Pari et al., "Shashlik calorimeters: novel compact prototypes for the ENUBET experiment" in 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors, Nucl. Instrum. Meth. A 936, p. 148 (2019)
- M. S. Pravikoff, P. Hubert, and H. Guégan, "Neutrino, wine and fraudulent business practices" in 15th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, CERN-Proceedings 1, p. 287 (2019)
- P. Puyuelo-Valdes et al., "Laser driven ion acceleration in high-density gas jets" in Laser Acceleration of Electrons, Protons, and Ions V, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng 11037, p. 110370B (2019)
- P. Quentin et al., "Collective Coupling between Intrinsic Vortical and Global Rotation Modes Revisited" in SDANCA19, Bulg. J. Phys. 46, p. 292 (2019)
- L. Rinchuso, "Latest results on dark matter searches with H.E.S.S." in 7th Roma International Conference on Astroparticle Physic (2019)
- B. Rubio et al., "Beta decay of the $T=2$ nucleus ^{64}Se and its descendants" in 42nd Symposium on Nuclear Physics, Cocoyoc, Mexico, J. Phys. Conf. Ser. 1308, p. 012018 (2019)
- F. Schüssler et al., "H.E.S.S. searches for TeV gamma rays associated to high-energy neutrinos" in 36th International Cosmic Ray Conference (2019)
- H. Seznec et al., "Évaluation in vitro de nouvelles approches thérapeutiques combinant rayonnements ionisants et nanoparticules d'oxydes métalliques". Séminaire Interdisciplinaire de l'Oncosphère Bordeaux. Le 12 juin 2019
- N. A. Smirnova, "Isospin-symmetry breaking in nuclear structure" in European Nuclear Physics Conference 2018, Nuovo Cimento C 42, p. 54 (2019)
- J. Surbrook et al., "Precision mass measurements of ^{44}V and ^{44}mV for nucleon-nucleon interaction studies" in 7th International Conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics, Hyperfine Interact. 240, p. 65 (2019)
- F. Terranova et al., "The ENUBET neutrino beam" in 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2018), arXiv:1903.09044 PoS 340, p. 239 (2019)



©Usav GRESTHA from Unsplash

**COMMUNICATIONS ORALES
EN CONFÉRENCES
ET WORKSHOPS,
POSTERS, SÉMINAIRES,
ACTIONS GRAND PUBLIC**

2015

P. Ascher, **"PIPERADE at DESIR: A double Penning trap for high resolution mass separation and an RFQ for beam cooling/bunching"**, Colloque GANIL, Port en Bessin, France, octobre 2015

P. Barberet et al., **"Targeted irradiation of living cells with a charged-particle microbeam"**. Séminaire au Laboratoire capteurs diamants CEA/LIST, Saclay, France, 2015

P. Barberet et al., **"Ionizing effects at the cellular scale: modeling realistic geometries"**, 1er Workshop Cancer & Technologies pour la Santé, Toulouse, France, 17-18 septembre 2015

B. Blank, **"Super-allowed beta decay - a tool for weak-interaction studies"**, ISOLDE PG seminar, Geneva, Switzerland, 12 mai 2015

B. Blank, **"2p radioactivity and β -delayed proton studies at LISE"**, LISE workshop, GANIL, Caen, France, 16-18 décembre 2015

J. Bordes et al., **"Implémentation de nouveaux modèles physiques pour la simulation des électrons de basse énergie dans le code de simulation Monte-Carlo Geant4-DNA"**, Retraite du Centre de Recherche en Cancérologie de Toulouse, Argelès, France, 30 septembre–1er octobre 2015

J.-C. Caillon, **"Entrée dans le monde de l'infiniment petit"**, café des sciences Lacq Odysée, Pau, France, février 2015

J.-C. Caillon, **"La possibilité des voyages interstellaires"**, "Village des sciences" de Cap Sciences, Bordeaux, France, 11 octobre 2015

C. Cerna, B. Soulé et F. Perrot, **"Radon emanation-based material measurement and selection for the SuperNEMO double beta decay experiment"**, Low Radioactivity Techniques 2015 workshop (LRT 2015), Seattle, WA, USA, 18-20 mars 2015

B. Condon et al., **"RCW 86: an extended SNR viewed at high energy with the new Fermi-LAT Pass 8 event reconstruction"**, 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, Netherlands, 2015

Z. El Bitar et al., **"Le projet Geant4-DNA: passé, présent, futur"**, 10ème atelier thématique du Cancéropôle Grand Ouest, Nantes, France, 12 juin 2015

Z. Francis et al., **"Monte Carlo modelling for radiation biology and hadron therapy"**, 21th International Science Conference of the Lebanese Association for the Advancement of Sciences, Beirut, Liban, 15-17 avril 2015

J. Giovinazzo, **"Status of developments for ACTAR TPC"**, RD51 mini-week, CERN, Switzerland, 6-9 juin 2015

J. Giovinazzo, **"Innovative technology for nuclear physics TPC collection plane"**, Colloque GANIL, France, 15-20 octobre 2015, (Poster)

J. Giovinazzo, **"Analysis of GET data samples for TPCs, Colloque GANIL"**, GANIL, France, 15-20 octobre 2015, (Poster)

J. Giovinazzo, **"Aluminium core collection plane for TPC"**, ACTAR TPC collaboration meeting, GANIL, France, 18-20 novembre 2015

J. Giovinazzo, **"GET data samples analysis"**, ACTAR TPC collaboration meeting, GANIL, France, 18-20 novembre 2015

J. Giovinazzo, **"Decay experiments with ACTAR TPC"**, ACTAR TPC collaboration meeting, GANIL, France, 18-20 novembre 2015

F. Gobet, **"Recent developments in nuclear excitations in plasma"**, 2nd joint seminar TUD/UB, Talence, France, 19 mai 2015

F. Gobet, **"Recent developments in nuclear excitations in plasmas"**, ICEL2015, Bucharest, Romania, 23-27 novembre 2015

S. Grévy, **"Beta decay studies of n-rich nuclei at LISE: Recent achievements and perspectives"**, LISE-ICC Workshop, Caen, France, 28-30 janvier 2015

S. Grévy, **"Beta delayed neutron spectroscopy using trapped radioactive ions"**, SPES Workshop "Physics at SPES", Milano, Italy, 20-21 avril 2015

S. Grévy, **"High Intensity Ion Guides and Purification Techniques for Low Energy Radioactive Ion Beams"**, International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics EMIS2015, Grand Rapids, MI, USA, 11-15 mai 2015

S. Grévy, **"Properties of intruder states in ^{34}Al and ^{34}Si "**, ISOLDE-CERN, Switzerland, septembre 2015

S. Grévy, **"The Use of Traps in Modern Nuclear Physics"**, Ecole Joliot Curie, Port-Barcarès, France, 27 septembre–2 octobre 2015

F. Hannachi, **"Nuclear Physics with lasers"**, 56th course: atoms and plasmas in super-intense laser fields, Erice, Italy, 12-22 juillet 2015

F. Hannachi, **"Modification of nuclear lifetimes in plasmas"**, ELI-NP School, Magurele, Romania, 21-25 septembre 2015

S. Incerti et al., **"Geant4 low energy electromagnetic physics"**, Geant4 electromagnetic physics meeting, CERN, Geneva, Switzerland, 9 mars 2015

S. Incerti et al., **"The Geant4-DNA platform: an open source platform for the simulation of ionizing radiation early biological damage on DNA"**, 21th International Science Conference of the Lebanese Association for the Advancement of Sciences, Beirut, Lebanon, 15-17 avril 2015

S. Incerti et al., **"Geant4 at the physics – biology frontier"**, 8th TYL- 7th FKPL Joint Workshop, Okinawa Institute of Technology, Okinawa, Japan, 20-22 mai 2015

S. Incerti et al., **"Geant4-DNA: past, present, future"**, Medical School, Ioannina University, Ioannina, Greece, 16 juin 2015

S. Incerti et al., **"Geant4 low energy electromagnetic physics"**, Geant4 electromagnetic physics meeting, CERN, Geneva, Switzerland, 29 juin 2015

S. Incerti et al., **"Status of Geant4-DNA"**, Geant4-DNA collaboration meeting, CRCT, Paul Sabatier University, Toulouse, France, 8-9 juillet 2015

S. Incerti et al., **"Geant4-DNA use cases"**, 11th Geant4 Space User's Workshop, Hiroshima, Japan, 26-28 août 2015

S. Incerti et al., **"Geant4 low energy electromagnetic physics"**, 11th Geant4 Space User's Workshop, Hiroshima, Japan, 26-28 août 2015

S. Incerti et al., **"Geant4 low energy electromagnetic physics"**, 20th Geant4 collaboration meeting, Fermilab, Batavia, IL, USA, 28 octobre–2 novembre 2015

S. Incerti et al., **"Geant4-DNA advanced example"**, 20th Geant4 collaboration meeting, Fermilab, Batavia, IL, USA, 28 octobre–2 novembre 2015

B. Jurado, **"Fission studies at HIE-ISOLDE with the TSR"**, TSR@ISOLDE Workshop, CERN, Switzerland, 27-28 avril 2015

B. Jurado, **"Neutron-induced cross sections of short-lived nuclei with the surrogate-reaction method"**, XIXth Colloque GANIL, Anglet, France, 12-16 octobre, 2015

B. Jurado, **"Study of the surrogate-reaction method via the simultaneous measurement of fission and gamma-decay probabilities"**, JEFF-NEEDS Workshop, Paris, France, 30 novembre-1er décembre 2015

T. Kurtukian-Nieto, **"Beta-decay studies of nuclei near the 1st r-process peak at SPES: challenges and opportunities"**, SPES Workshop "Physics at SPES", Milano, Italy, 20-21 Avril, 2015

N. Lampe et al., **"The IRIS Project"**, Deep Underground Laboratories Integrated Activities in Biology Workshop, Canfranc, Spain, 13-14 octobre 2015

M. Lemoine-Goumard, **"Rapporteur talk of the ground-based gamma-ray astronomy session"**, International Cosmic-Ray Conference, La Haye, Netherlands, 30 juillet-6 août 2015

B. Lott, **"Project of Masterclass in Gamma-ray Astronomy"**, meeting IPPOG 2015, Paris Jussieu, France, 16 avril 2015

B. Lott, **"Blazars seen by the Fermi LAT"**, Relativistic Jets: Creation, Dynamics, and Internal Physics, Kraków, Poland, 23 avril 2015

- B. Lott, **"L'astronomie en rayons gamma"**, Société Astronomique de Bordeaux, Bordeaux, France, 30 mai 2015
- B. Lott, **"L'Univers violent vu en rayons gamma"**, conférence devant les élèves de première année d'Ecole d'Ingénieur et IUT parallèlement aux **"Rencontres de Blois"**, Blois, France, 3 juin 2015
- B. Lott, **"Recent highlights from the Fermi LAT"**, 27èmes Rencontres de Blois, Blois, France, 3 juin 2015
- B. Lott, **"L'Astrophysique des Hautes Énergies vue par Fermi"**, GANIL, Caen, France, 5 juin 2015
- B. Lott, **"Gamma-ray astronomy"**, conférence devant les professeurs de l'école "High-School Teachers 2015", CERN, Geneva, Switzerland, 15 juillet 2015
- B. Lott, **"Les lumières du ciel"**, conférence grand public dans le cadre de l'Année de la Lumière, Sigoulès, Dordogne, France, 8 octobre 2015
- B. Lott, **"L'Univers violent vu en rayons gamma"**, conférence devant une classe de première du Lycée de la Mer de Gujan-Mestras, France, 13 octobre 2015
- L. Maigne et al., **"Overview of Geant4-DNA"**, Workshop du groupe de travail "WP2" du projet France-Hadron, Paris, France, 4 mars 2015
- P. Marini, **"Accessing neutron-induced cross sections of actinides. Advantages and challenges of direct and indirect methods"**, IPHC Strasbourg, France, 27 février 2015
- P. Marini, **"Strengths and limitations of the surrogate reaction method to access neutron-induced cross sections of actinides"**, 14th International Conference on nuclear reaction mechanisms, Varenna, Italy, 15-19 juin 2015
- P. Marini, **"First simultaneous measurement of fission and gamma probabilities of ^{237}U and ^{239}Np via surrogate reactions"**, CNRS* 15 - 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, Tokyo, Japan, octobre 2015
- P. Marini, **"Development of a gaseous proton-recoil detector for fission cross-section measurements below $E_n = 1$ MeV"**, WONDER international workshop, Aix-en-Provence, France, 5-8 octobre 2015, (Poster)
- P. Marini, **"A gaseous proton-recoil detector for neutron-induced fission cross section measurements at energies below 1 MeV"**, JEFF-NEEDS Workshop, Paris, France, 30 novembre-1er décembre 2015
- L. Martin, S. Incerti, and N. Mercier, **"Testing the Dosivox software for basic dosimetric cases, comparison with tabulated data"**, UK Luminescence and Electron Spin Resonance meeting, Glasgow, UK, 8-10 juillet 2015
- L. Martin et al., **"Potential of 2D-modeling for beta dose rate characterization in heterogeneous samples"**, 4th Asia Pacific Luminescence and Electron Spin Resonance dating conference, Adelaide, Australia, 23-25 novembre 2015
- A. Mereaglia, **"Latest results from Double Chooz"**, Les Rencontres de Physique de la vallée d'Aoste, La Thuile, Italy, 1er-7 mars 2015
- A. Mereaglia, **"A novel beam line for the measurement of the electron neutrino cross-section"**, GDR neutrino, Saclay, France, 5 novembre 2015
- S. Meylan, S. Incerti, et C. Villagrasa, **"Développement d'un outil de simulation multi-échelle adapté au calcul des dommages radio-induits précoces dans les cellules exposées à des irradiations d'ions"**, Journée de l'École Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, U. de Bordeaux, France, 6 mars 2015
- S. Meylan et al., **"Calculations of DNA double strand breaks with the multi-scale simulation tool based on the Geant4-DNA MC code and a new molecular target geometry"**, BioQuaRT Final Workshop **"Towards biologically relevant dosimetry"**, Barcelona, Spain, 22-23 avril 2015
- G. Muggioli et al., **"Radiation sensitivity of sarcoma cell lines"**, Marie Curie Alumni Association: Annual General Assembly, Porto, Portugal, 6-7 février 2015
- G. Muggioli et al., **"Effectiveness of proton and electron beams in sarcoma cell lines"**, 15th International Conference of Radiation Research, Kyoto, Japan, 25-29 mai 2015
- G. Muggioli et al., **"The CENBG microbeam irradiation system for studies of radiation-induced responses in cells and multicellular organisms"**, 15th International Conference of Radiation Research, Kyoto, Japan, 25-29 mai 2015
- G. Muggioli et al., **"Application of particle microbeam for radiation sensitivity studies"**, 12th International Workshop on Microbeam Probes of Cellular Radiation Response, Tsuruga, Japan, 30 mai - 1er juin 2015
- G. Muggioli et al., **"Radio-sensitivity of sarcoma cell lines depending on irradiation methods and ionizing radiation types"**, Conférence du Canceropôle Grand Sud-Ouest, Toulouse, France, 17-18 septembre 2015
- G. Muggioli et al., **"Radio-sensitivity of sarcoma cell lines. From genetics to personalized treatment"**, SPRITE Management meeting, Leuven, Belgium, 13-14 octobre 2015
- S. Okada et al., **"Acceleration of Geant4-DNA physics models performance using graphics processing unit"**, 8th TYL- 7th FKPL Joint Workshop, Okinawa Institute of Technology, Okinawa, Japan, 20-22 mai 2015
- R. Ortega, **"Cell and tissue imaging of chemical elements: PIXE and synchrotron analyses"**, Mini-colloque sur le fer, son homéostasie et sa toxicité dans le système nerveux et apparenté: protection par chélation, Paris, France, 9 mars 2015
- F. Perrot, **"Le prix Nobel de Physique 2015"**, interview donnée à TV7, à la suite de l'attribution du prix Nobel de Physique 2015 pour la découverte des oscillations de neutrinos, Bordeaux, France, 2015
- F. Perrot et C. Cerna, **"Sciences à l'antenne-Neutrinos Quésako ?"**, interview Radio Campus Bordeaux à la suite de l'attribution du prix Nobel de Physique 2015 pour la découverte des oscillations de neutrinos, Bordeaux, France, 2015
- F. Piquemal, **"La nature du neutrino"**, Congrès de la société Française de Physique, Strasbourg, France, 24-28 août 2015
- F. Piquemal, **"Le prix Nobel 2015 pour la physique du neutrino"**, CENBG, France, 2015
- F. Piquemal, **"L'énigmatique neutrino"**, Université de Bordeaux, dans le cadre du prix Nobel de physique 2015, Bordeaux, France, 2015
- F. Piquemal, **"L'énigmatique neutrino"**, Société d'astronomie de Nantes, Nantes, France, 2015
- F. Piquemal, **"Infiniment petit, infiniment grand"**, Lycée de Pons, interventions pour seconde, première et terminale, Pons, France, 2015
- P. Quentin, **"Le cosmos est-il fini ou non ? Histoire des conceptions des pré-socratiques à Albert Einstein"**, ICES, La Roche-sur-Yon, France, 4 février 2015
- P. Quentin, **"The many challenges of microscopic calculations of fission barriers"**, CEA Cadarache, Saint Paul-lez-Durance, France, 20 octobre 2015
- P. Quentin, **"The many challenges of a microscopic description of potential energy surfaces"**, Bordeaux-Malaysia Winter School on Nuclear Sciences, Universiti Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia, 3-5 novembre 2015
- P. Quentin, **"The many challenges of microscopic calculations of fission barriers"**, Hue University, Hue, Vietnam, 11 novembre 2015
- P. Quentin, **"Fission barriers of two odd-neutron nuclei"**, University Marie-Curie Skłodowska, Lublin, Poland, 15 décembre 2015
- C. Sergeant, **"En mission scientifique à Tchernobyl, 20 ans après la catastrophe"**, Société Astronomique de Bordeaux, France, 18 mars 2015
- C. Sergeant et al., **"Quelles communautés bactériennes présentes à proximité d'un ancien site minier d'Uranium ?"**, 3ème colloque des Zones Ateliers, Paris, France, 14-16 octobre 2015
- C. Sergeant et al., **"Quelles communautés bactériennes présentes à proximité d'un ancien site minier d'Uranium ?"**, VIIe colloque de l'AFEM, Anglet, France, 4-6 novembre 2015
- H. Seznec et al., **"In vitro evaluation of emerging cancer therapy protocols combining protons and/or nanoparticles. From in silico to in vitro studies"**, Laser technology and Biomedical applications symposium, Bordeaux, France, 11-12 juin 2015

H. Seznec et al., **"Molecular Basis of TiO₂ nanoparticles toxicity on human cells: effect of various morphologies on cell proliferation, calcium homeostasis and reticulum stress"**, Laboratoire Institut Sciences Moléculaires d'Orsay - UMR8214, Université Paris Sud, France, 29 septembre 2015

H. Seznec et al., **"Microfaisceaux d'ions et Sciences du Vivant. Applications à l'étude des contaminants physiques: des rayonnements ionisants aux nanoparticules"**, Service de Radiothérapie/Oncologie Clinique du CHU Haut-Lévêque, Pessac, France, 10 novembre 2015

H. Seznec et al., **"Microfaisceaux d'ions et Sciences du Vivant. Applications à l'étude des contaminants physiques: des rayonnements ionisants aux nanoparticules"**, Laboratoire d'écotoxicologie des radionucléides (Leco) - IRSN, Centre Études Nucléaires de Cadarache, France, 14 décembre 2015

J. I. Shin et al., **"Proton LET measurement using nuclear emulsion and TED at the National Cancer Center"**, 8th TYL- 7th FKPL Joint Workshop, Okinawa Institute of Technology, Okinawa, Japan, 20-22 mai 2015

J. I. Shin et al., **"Proton LET measurement using nuclear emulsion and TED at the National Cancer Center"**, 37th Czech/Slovak Days of Radiation Protection Conference, Zámek Mikulov, Jižní Morava, Czech Republic, 11-13 novembre 2015

N. Smirnova, **"Structure and decay modes of exotic neutron-deficient nuclei"**, Second Joint Seminar University of Bordeaux and Technical University of Darmstadt, Bordeaux, France, 18-19 mai 2015

D. A. Smith, **"Big Bang: le début du temps"**, Société Astronomique de Bordeaux, France, 21 janvier 2015

D. A. Smith, **"La Lumière"**, lors de l'inauguration de l'année internationale de la lumière à l'Hôtel de Région Aquitaine, Bordeaux, France, 29 janvier 2015

D. A. Smith, **"L'astronomie"**, avec les élèves du club d'astronomie du Lycée Vaclav Havel, Bordeaux, France, 30 janvier 2015

D. A. Smith, **"Le ciel en rayons gamma avec le satellite Fermi"**, IPNL/In2p3, Lyon, France, 6 mars 2015

D. A. Smith, **"Le Soleil"**, Lycée Vaclav Havel, Bègles, France, 13 avril 2015

D. A. Smith, **"Pulsars gamma, et poussière d'étoiles"**, Pint of Science, Bordeaux, 20 mai 2015

D. A. Smith, **"Gamma-ray Pulsars with the Fermi satellite"**, Institut Max Planck (MIPAP), Garching, Allemagne, septembre 2015.

D. A. Smith, **"Détection Spatiale de Particules"**, Espace Mendès France, Poitiers, France, 8 décembre 2015

M. Tarisien, **"La physique nucléaire auprès des lasers de puissance"**, Société Astronomique de Bordeaux, Bordeaux, France, 15 avril 2015

M. Tarisien, **"Laser driven de-excitation of ^{84m}Rb"**, ICEL2015, Bucharest, Romania, 23-27 novembre 2015

I. Tsekhanovich, **"Nuclear physics research from the viewpoint of applications"**, UM-UKM-University of Bordeaux winter school on Nuclear Physics, University of Malaya, Kuala-Lumpur, Malaysia, 3-5 novembre 2015

M. Versteegen, **"The ¹¹⁵mIn metastable state photo-excitation as a γ beam monitor at ELI-NP"**, ICEL2015, Bucharest, Romania, 23-27 novembre 2015

M. Versteegen, **"Low Energy Enhancement in the γ -ray Strength of ¹¹⁵In from Photoactivation Data"**, CNR* 15, Tokyo, Japan, 19-23 octobre 2015



P. Ascher, **"Mass measurements of light neutron-rich nuclei with SPIRAL1 beams"**, SPIRAL1 Workshop, GANIL, Caen, France, février 2016

P. Ascher, **"A double Penning trap for high-resolution mass separation and an RFQ for beam cooling/bunching"**, Application of lasers and storage devices in atomic nuclei research, Poznan, Poland, 16-19 mai 2016

B. Blank, **"Beta-delayed two-proton decay studies"**, SPIRAL1 workshop, GANIL, Caen, France, 8-10 février 2016

B. Blank, **"Production rates by fusion-evaporation at SPIRAL1"**, SPIRAL1 workshop, GANIL, Caen, France, 8-10 février 2016

B. Blank, **"Two-proton radioactivity - a new tool for nuclear structure"**, 11th Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure - The Many Facets of Nuclear Structure, Bormio, Italy, 22-28 février 2016

B. Blank, **"Two-proton radioactivity - a new tool for nuclear structure"**, Workshop of the COLL-AGAIN, COPIGAL, and POLITA collaborations, LNS Catania, Italy, 26-29 avril 2016

B. Blank, **"Two-proton radioactivity - a tool for nuclear structure"**, Physikalisches Kolloquium, Physik Department, TU Dresden, Germany, 24 mai 2016

B. Blank, **"Limits on scalar currents using the positron-neutrino correlation from $\beta\beta$ decay of $T_1 = -2$ nuclei"**, ISOLDE group meeting, Geneva, Switzerland, 14 septembre 2016

B. Blank, **"Weak interaction studies with radioactive nuclei"**, EURISOL DF 2016, Leuven, Belgium, 18-21 octobre 2016

B. Blank, **"From β -decay to exotic decays"**, GANIL-SPIRAL2 Week 2016, Caen, France, 21-24 novembre 2016

B. Blank, **"Weak interaction studies with radioactive nuclei"**, ISOLDE Workshop and Users meeting, Geneva, Switzerland, 7-9 décembre 2016

F. Brun, **"The Fermi-LAT and H.E.S.S. views of the supernova remnant W49B"**, conférence 10th Cosmic Ray International Seminar, juillet 2016

J.-C. Caillon, **"Les voyages interstellaires entre rêve et réalité"**, organisée par Lacq Odyssée, Bayonne, France, 2016

J.-C. Caillon, **"Le grand tout un film de Nicolas Bazz"**, Bègles, France, 22 janvier 2016

J.-C. Caillon, **"Les voyages interstellaires entre rêve et réalité"**, Le labo parle au labo, CENBG, Gradignan, France, juin 2016

J.-C. Caillon, **"En avant vers le passé..."**, Le labo parle au labo, CENBG, Gradignan, France, septembre 2016

A. Carmona, **"Particle induced X-ray emission imaging of gadolinium distribution into xenograft U87 human glioblastoma after AGuIX nanoparticles injection"**, Microscopy and Microanalysis, Columbus, OH, USA, 24-28 juillet 2016, (Poster)

C. Cerna et al., **"The SuperNEMO calorimeter"**, 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2016), Chicago, IL, USA, 3-10 juin 2016

C. Cerna et al., **"The SuperNEMO calorimeter"** in 27th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2016), London, UK, 4-9 juillet 2016

B. Condon et al., **"RX J1713.7-3946 at GeV energies: a mixture of leptonic and hadronic emission ?"**, 6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Gamma2016), Heidelberg, Germany, 2016

J. Giovannozzo, **"2-proton radioactivity studies overview"**, BoVaRi collaboration meeting, Valencia, Spain, 22-25 novembre 2016

J. Giovannozzo, **"Proton(s) emission experiments with ACTAR TPC"**, ISE ICC workshop, GANIL, Caen, France, 12-14 décembre 2016

F. Gobet, **"Electron Extraction from an Expanding Laser Induced Plasma Cathode"**, 43rd IEEE International Conference on Plasma Science, Banff (Alberta), Canada, 19-23 juin 2016

S. Grévy, **"Quelle(s) expérience(s) pour quelle(s) observable(s)"**, Journées SFP 2016, Paris, France, juin 2016

S. Grévy, **"Survey of the main experimental setups for low energy ISOL Physics"**, 3rd international SPES workshop, Padova, Italy, 10-12 octobre 2016

M.-H. Grondin, **"New Extended GeV Sources in the Galactic Plane Found using 6 years of Fermi-LAT Pass 8 data"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), Observatoire de Paris, Meudon, France, 18-20 mai 2016

- M.-H. Grondin, **"New Extended GeV Sources in the Galactic Plane Found in a Search of the Pass 8 data from Fermi-LAT"**, Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death, Chania (Crete), Greece, 6-11 juin 2016
- S. Guatelli, S. Incerti, and V. Ivantchenko, **"Geant4-DNA: A Monte Carlo package to characterize the effect of high-Z nanoparticles in radiotherapy"**, MMND-NITRO conference, Wrest Point (Tasmania), Australia, 26-31 janvier 2016
- S. Guatelli, S. Incerti, and V. Ivantchenko, **"Geant4 for medical physics: overview and recent developments"**, MMND-NITRO conference, Wrest Point (Tasmania), Australia, 26-31 janvier 2016
- S. Guatelli and S. Incerti, **"Predicting the physical and the physico/chemical mechanism of DNA damage: The Geant4-DNA project"**, 14th International Workshop of Radiation Damage to DNA, Melbourne, Australia, 20-24 mars 2016
- F. Hannachi, **"APOLLON: present status and perspectives"**, Nuclear Photonics, Monterey, CA, USA, 16-21 octobre 2016
- A. Huber, **"Recherche de la nature du neutrino: mise en route, simulation et analyse des données du démonstrateur SuperNEMO"**, Ma thèse en 180 secondes, Université de Bordeaux (2016)
- C. Jollet, **"Status report and Physics Perspectives of JUNO"**, Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, La Thuile, Italy, 6-12 mars 2016
- C. Jollet, **"The JUNO top tracker"**, 9th France-China Particle Physics Laboratory Workshop, Strasbourg, France, 30 mars-1er avril 2016
- B. Jurado, **"Bilan sur le projet ACTISUR: étude de la méthode de substitution à partir de la mesure simultanée de la probabilité de fission et d'émission gamma"**, Atelier bilan NEEDS, Paris, France, 7-8 janvier 2016
- B. Jurado, **"Surrogate-reaction studies in storage rings"**, Workshop on Nuclear Astrophysics at storage Rings (NucAR), Frankfurt, Germany, 18-19 février 2016
- B. Jurado, **"Insensitivity of the fission threshold to angular momentum"**, Fission at FUSTIPEN II: recent observables and their modeling, GANIL, Caen, France, 3-4 mai 2016
- B. Jurado, **"Investigating the surrogate-reaction method via the simultaneous measurement of fission and gamma-decay probabilities"**, ND2016, International conference on Nuclear Data for science and technology, Bruges, Belgium, 11-16 septembre 2016
- B. Jurado, **"Investigation of the $^{238}\text{U}(d,p)$ surrogate reaction via the simultaneous measurement of fission and gamma-decay probabilities"**, ECT Workshop "Three-body systems in reactions with rare isotopes", Trento, Italy, 3-7 octobre 2016
- B. Jurado, **"Étude de la méthode de substitution à partir de la mesure simultanée des probabilités de fission et d'émission gamma"**, CEA-DAM Arpaion, France, 8 novembre 2016
- B. Jurado, **"Investigation of the surrogate-reaction method via the simultaneous measurement of gamma-emission and fission probabilities"**, Advanced Science Research Center of the Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Japan, 8 décembre 2016
- T. Kurtukian-Nieto, **"Experience with $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ reactions"**, Nuclear Astrophysics at the Canfranc Underground Laboratory, Canfranc, Spain, 29 février-1 mars 2016
- T. Kurtukian-Nieto, **"Measurement of the decay characteristics of nuclei around $A=90$ relevant to the r-process nucleosynthesis"**, Third International SPES Workshop", Legnaro, Italy, 10-12 Octobre 2016.
- M. Lemoine-Goumard, **"Acceleration of cosmic rays at SNR shocks: constraints from gamma-ray observations"**, Supernova remnants: an odyssey in space after stellar death, Chania (Crete), Greece, 6-11 juin 2016
- B. Lott, **"Quatre cours sur les blazars, les catalogues de Fermi, la méthode 'adaptive-binning' et le projet cosmax"**, Sixth Fermi Summer School (NASA - University of Delaware), Lewes, DE, USA, juin 2016
- B. Lott, **"Les Trous Noirs"**, Fête de la Science, Société Astronomique de Bordeaux, France, 12 octobre 2016
- B. Lott, **"Présentation sur les rayons cosmiques et l'astronomie gamma"**, classe de Terminale S du Lycée Fesch d'Ajaccio, France, 14 octobre 2016
- P. Marini, **"Signals of Bose-Einstein condensation in the decay of hot nuclear systems"**, International Workshop on Multifacets of EoS and Clustering, Caen, France, 9-12 mai 2016
- P. Marini, **"Searching for signals of Bose-Einstein condensation in the decay of hot nuclear systems"**, FUSTIPEN topical meeting, GANIL, Caen, France, 17-19 mai 2016
- P. Marini, **"Development of a gaseous proton-recoil detector for neutron flux measurements between 0.2 and 2 MeV neutron energy"**, ND2016, International conference on Nuclear Data for science and technology, Bruges, Belgium, 11-16 septembre 2016
- C. Marquet, **"The SuperNEMO Calorimeter"**, 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2016), Chicago, IL, USA, PoS (ICHEP2016), 1037 (2017), 3-10 juin 2016
- L. Mathieu, **"Accurate measurement of a fission chamber efficiency using the prompt fission neutron method"**, ND2016, International conference on Nuclear Data for science and technology, Bruges, Belgium, 11-16 septembre 2016
- A. Mereaglia, **"Latest results from OPERA"**, International workshop on Theory, Phenomenology and Experiments in Flavour Physics, Capri, Italy, 13-24 juin 2016
- A. Mereaglia, **"The ENUBET project"**, 14th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (IPRD16), Siena, Italy, 3-6 October 2016
- A. Mereaglia, **"NuToPs: neutrino tagging with ortho-positronium"**, Saclay, France, 15 mars 2016
- A. Mereaglia, **"Latest results from OPERA"**, International workshop on Theory, Phenomenology and Experiments in Flavour Physics, Capri, Italy, 13-24 June 2016
- S. Meylan et al., **"Modeling of the human genome with DnaFabric for the calculation of radio-induced DNA damages"**, Joint 13th International Conference on Radiation Shielding and 19th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division of the ANS, Paris, France, 3-6 octobre 2016
- R. Ortega, **"Metals pinpointed at dendritic spines in glutamatergic neurons"**, 6th International Conference on Metals in Genetics, Chemical Biology, and Therapeutics, Bangalore, India, 17-20 février 2016
- R. Ortega, **"Correlative chemical element imaging in cells using fluorescence microscopy and synchrotron X-ray fluorescence"**, Microscopy and Microanalysis, Columbus, OH, USA, 24-28 juillet 2016
- R. Ortega, **"Imagerie PIXE de l'U dans les cellules neuronales humaines: apport pour la compréhension des mécanismes de neurotoxicité"**, Journées Nationales de Radiochimie et de Chimie Nucléaire, Nice, France, 8-9 septembre 2016
- F. Perrot, **"Low radioactivity measurements for the JUNO experiment"**, 9th France-China Particle Physics Laboratory Workshop, Strasbourg, France, 30 mars-1er avril 2016
- F. Perrot, **"L'énigmatique neutrino"**, Lycée Montaigne de Bordeaux, France (2016)
- F. Piquemal, **"L'Univers"**, Intervention au lycée Jay de Beaufort, Périgueux, France (2016)
- F. Piquemal, **"L'énigmatique neutrino"**, CERN French Teacher school, Genève, Suisse (2016)
- F. Piquemal, **"L'énigmatique neutrino"**, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux, Pessac, France, 2016
- F. Piquemal, **"Infiniment petit, infiniment grand"**, Lycée de Pons, interventions pour seconde, première et terminale, Pons, France (2016)
- F. Piquemal, **"L'interdisciplinaire au Laboratoire Souterrain de Modane"**, Workshop MITI-CNRS, Modane, France, 25-26 janvier 2016
- F. Piquemal, **"Interface avec la physique du neutrino"**, Journées SFP-BTPN sur "les grandes questions de la physique nucléaire", CNRS Campus Gérard Mégie, Paris, France, 23 juin 2016
- P. Quentin, **"The nuclear many-body problem"**, École Normale supérieure d'Alger, Vieux-Kouba, Algeria, 13 avril 2016
- P. Quentin, **"Symmetries in the many-body problem"**, Bordeaux-Malaysia Winter School on Nuclear Sciences, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Skudai, Malaysia, 10-12 décembre 2016

P. Quentin, **"Nuclear isomers"**, Bordeaux-Malaysia Winter School on Nuclear Sciences, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Skudai, Malaysia, 12-14 décembre 2016

J. Ramos-Méndez et al., **"Flagged uniform particle split as variance reduction technique for proton track-structure simulations with the TOPAS-nBio Monte Carlo tool"**, 62nd Annual International Meeting, Radiation Research Society, Waikoloa Village, Hawaii, USA, 16-19 octobre 2016

X. Raymond, **"A new bright electron beam for (e,e') nuclear excitation cross section measurements in the keV range"**, Ecole Joliot Curie 2016, Port Barcarès, France, 25-30 septembre 2016, (Poster)

S. Roudeau, **"Characterization of SOD1 pl isoforms in amyotrophic lateral sclerosis and Parkinson's disease: net charge, metal content and number of isoforms"**, 6th International Conference on Metals in Genetics, Chemical Biology, and Therapeutics, Bangalore, India, 17-20 février 2016

C. Sergeant et M.-H. Vesvres, **"Recherche de bactéries anaérobies dans des sols contaminés en radioéléments"**, Journées thématiques de l'AFEM: "Les écosystèmes anaérobies", Marseille, France, 31 mai-1er juin 2016

C. Sergeant et al., **"Inventaire des communautés bactériennes à proximité d'un ancien site minier d'Uranium français"**, XVèmes Journées Nationales de Radiochimie et de Chimie Nucléaire, Nice, France, 8-9 septembre 2016

J. I. Shin et al., **"Proton LET measurement using nuclear emulsion and TED at the National Cancer Center"**, 55th Annual Meeting of Particle Therapy Co-Operative Group, Protontherapy Center, Prague, Czech Republic, 22-28 mai 2016

N. Smirnova, **"Recent developments of isospin-nonconserving shell model with applications to the structure and decay of proton-rich nuclei"**, Korean Physical Society Spring Meeting, Daejeon, South Korea, 20-22 avril 2016

N. Smirnova, **"Isospin mixing in nuclear states studied via beta-delayed proton emission"**, Isolde Workshop, CERN, Genève, Switzerland, 7-9 décembre 2016

D. A. Smith, Club d'Astronomie ABERA, Bègles, France, 12 février 2016

D. A. Smith, **"Première détection d'ondes gravitationnelles"**, Café Labo du CENBG, Gradignan, France, 23 février 2016

D. A. Smith, **"Gamma-ray Pulsars with the Fermi satellite"**, Munich Joint Astronomy Colloquium, European Southern Observatory (ESO), Garching, Germany, avril 2016

D. A. Smith, **">200 Gamma-ray Pulsars with the Fermi satellite"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), Meudon, France, 18 mai 2016.

D. A. Smith, **"Gamma-ray Pulsars with Fermi"**, symposium INTEGRAL 2016, Amsterdam, Netherlands, octobre 2016

D. A. Smith, **"Les Pulsars en rayons gamma"**, Club d'astronomie Vega de la Lyre, Vayres, France, 10 décembre 2016

J. J. Tello et al., **"Validation Study of the Dual Radiation Action Theory by Numerical Simulation"**, 13th Congreso Argentino de Física Médica, 7th Congreso Latinoamericano de Física Médica, Villa Carlos Paz, Argentina, 4-7 septembre 2016

I. Tsekhanovich, **"New results on fission in the sub-lead region"**, 40th ASRC International Workshop on Experimental and Theoretical Advances in Fission and Heavy Nuclei, Tokai, Japan, 14 décembre 2016

M. Versteegen, **"Plasma expansion dynamics and electron extraction in an electric field"**, EPS2016 43rd Conference on Plasma Physics, Leuven, Belgium, 4-8 juillet 2016



P. Ascher, **"Mass measurements of neutron-deficient nuclei at S3-LEB and at S3-DESIR"**, First physics with S3, IRFU Saclay, France, 27-30 mars 2017

P. Ascher, **"ISOL activities at CENBG: Manipulation of beams and masses"**, ISOL-France Meeting, CSNSM Orsay, France, 26-27 avril 2017

P. Ascher, **"Status of the DESIR facility"**, XXth Colloque GANIL, Amboise, France, 15-20 octobre 2017

S. Bakr et al., **"Inclusion of novel proton and alpha ionisation cross sections in Geant4"**, Innovation in Radiation Applications 2017, Wollongong University, Wollongong, Australia, 20-22 avril 2017

M. A. Bernal et al., **"Towards a fully Monte Carlo-based method for RBE estimation"**, International conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Naples, Italy, 15-18 octobre 2017

B. Blank, **"Cluster radioactivity studies at S3"**, First physics with S3, IRFU Saclay, France, 25-28 mars 2017

B. Blank, **"Weak Interaction Studies with ³²Ar Decay: WISARd"**, Conseil Scientifique du CENBG, Gradignan, France, 11 mai 2017

B. Blank, **"Two-proton radioactivity as a tool of nuclear structure"**, ARIS conference, Keystone, Colorado, USA, 27 mai – 2 juin 2017

B. Blank, **"Two-proton radioactivity as a tool of nuclear structure"**, University of Notre Dame, South Bend, IN, USA, 5 juin 2017

B. Blank, **"New proton-rich isotopes and two-proton radioactivity"**, Mazurian Lakes Conference, Piaski, Poland, 3-9 septembre 2017

B. Blank, **"Highlights from the 2015 Colloque GANIL"**, Colloque GANIL 2017, Amboise, France, 15-20 octobre 2017

B. Blank, **"Experimental challenges in extracting the Vud matrix element"**, Solvay Workshop: Beyond the Standard Model with Neutrinos and Nuclear Physics, Brussels, Belgium, 29 novembre–1er décembre 2017

D. Bolst et al., **"Validation of Geant4 Fragmentation for Heavy Ion Therapy"**, International conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Naples, Italy, 15-18 octobre 2017

L. Bonneau, **"Modern effective interactions"**, BMinNT workshop, Strasbourg, France, 26-30 juin 2017

J. Bordès et al., **"Monte-Carlo modelling of energy deposition within a realistic 3D model of follicular lymphoma"**, 30th Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine 2017, Vienna, Austria, 21-25 octobre 2017

F. Brun, **"The Milky Way as seen in VHE gamma-rays with H.E.S.S."**, ECAP, Erlangen, Germany, 6 juillet 2017

F. Brun, **"Ten years of H.E.S.S. I extra-galactic observations revisited"**, Fermi Symposium, Garmisch-Partenkirchen, Germany, octobre 2017

J.-C. Caillon, **"Les voyages interstellaires entre rêve et réalité"**, Photonique appliquée à l'astrophysique, Université de Bordeaux, mars 2017

E. Chauveau (Double Chooz collaboration), **"Latest results of the Double Chooz reactor neutrino experiment"**, ICPPA 2017, Moscow, Russia, 2-5 octobre 2017

B. Condon, **"Detection of two TeV shell-type remnants at GeV energies with Fermi-LAT: HESS J1731-347 and SN 1006"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), GANIL, Caen, France, 9-11 mai 2017

D. Denis-Petit, **"Surrogate-reaction studies at storage rings"**, NucAR collaboration meeting, Gradignan, France, mars 2017

D. Denis-Petit, **"Investigating the surrogate method via the simultaneous measurement of fission and gamma-emission probabilities"**, 6th Workshop on Nuclear Level Density and Gamma Strength, Oslo, Norway, 8-12 mai 2017

D. Denis-Petit, **"Nuclear excitations in plasmas"**, ELI-France users' workshop, Paris, France, 5-7 juillet 2017

Z. El Bitar, and S. Incerti, **"The Geant4-DNA project: overview and recent developments"**, 27th International Conference on Nuclear Tracks and Radiation Measurements, Strasbourg, France, 28 août–1er septembre 2017

J. Giovinozzo, **"2-proton radioactivity: from theoretical prediction to experimental observation"**, LPSC Grenoble, France, 14 mars 2017

- J. Giovinozzo, "Exotic decay studies at low energy facilities", ISOL-France meeting, IPN Orsay, France, 26-27 avril 2017
- J. Giovinozzo, "GET data samples processing for ACTAR TPC tracking", journées réseau R&D instrumentation, LPC Caen, France, 4-5 octobre 2017
- F. Gobet, "SPEEP: une source intense d'électrons de basse énergie extraits d'une cathode plasma en expansion", Les journées accélérateurs, Roscoff, France, 3-6 octobre 2017
- S. Grévy, "Les grands enjeux en structure nucléaire", Présentation Conseil Scientifique IN2P3, Paris, France, 26-27 octobre 2017
- M.-H. Grondin, "New Extended GeV Sources in the Galactic Plane Found using 6 years of Fermi-LAT Pass 8 data", 7th International Fermi Symposium, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 15-20 octobre 2017
- S. Guatelli, et S. Incerti, "Monte Carlo simulation of early biological damage induced by ionizing radiation at the DNA scale: overview of the Geant4-DNA project", Innovation in Radiation Applications 2017, Wollongong University, Wollongong, Australia, 20-22 avril 2017
- S. Guatelli et al., "Geant4 for medical physics: latest developments", Geant4 User Workshop, Wollongong University, Wollongong, Australia, 19-22 septembre 2017
- F. Hannachi, "Laser-driven nuclear physics", 57th course: atoms and plasmas in super-intense laser fields, Erice, Italy, 7-17 juillet 2017
- J. L. Henares, "Laser ion acceleration in dense gas jet targets", Targ3-3rd Targetry for high repetition rate laser-driven sources workshop, Salamanca, Spain, 21-23 juin 2017
- S. Incerti, "Geant4 pour la biologie", Le labo parle au labo, CENBG, Gradignan, France, 6 février 2017
- S. Incerti et al., "Geant4 low energy electromagnetic physics", Geant4 electromagnetic physics meeting, CERN, Geneva, Switzerland, 8 février 2017
- S. Incerti et al., "The Geant4-DNA project", FJPL meeting, CC IN2P3, Villeurbanne, France, 14 février 2017
- S. Incerti et al., "Low energy electromagnetic physics for Geant4 10.4 Beta", Geant4 electromagnetic physics meeting, CERN, Geneva, Switzerland, 8 juin 2017
- S. Incerti et al., "Overview of the Geant4-DNA project", Geant4 User Workshop, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam, 16 juin 2017
- S. Incerti et al., "Monte Carlo simulation of early biological damage induced by ionizing radiation at the DNA scale: overview of the Geant4-DNA project", Yonsei University, Wonju, South Korea, 28 juillet 2017
- S. Incerti et al., "The France-Korea 'FKPPL' associated international laboratory", Yonsei University, Wonju, South Korea, 28 juillet 2017
- S. Incerti et al., "Recent developments of the Geant4-DNA extension of the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit", Geant4 User Workshop, Wollongong University, Wollongong, Australia, 19-22 septembre 2017
- S. Incerti et al., "New Geant4-DNA extended examples", 22th Geant4 collaboration meeting, Wollongong University, Wollongong, Australia, 25-29 septembre 2017
- S. Incerti et al., "Geant4 low energy electromagnetic physics", 22th Geant4 collaboration meeting, Wollongong University, Wollongong, Australia, 25-29 septembre 2017
- S. Incerti et al., "Recent developments of the Geant4-DNA project", colloque thématique du GDR MI2B, IPNL, Lyon, France, 12-13 octobre 2017
- S. Incerti et al., "Geant4-DNA: collaboration update and task list", Geant4-DNA collaboration meeting, IRSN, Fontenay-aux-Roses, France, 7 décembre 2017
- S. Incerti et al., "Geant4 very low energy electromagnetic physics", Geant4 EM meeting, CERN, Switzerland, 8 décembre 2017
- V. Ivantchenko, and S. Incerti, "Geant4 EM Physics status", Geant4 Technical Forum, CERN, Switzerland, 11 janvier 2017
- V. Ivantchenko, and S. Incerti, "Highlights or recent patch release & 2017 work plan – EM physics part", Geant4 Technical Forum, CERN, Switzerland, 23 mars 2017
- V. Ivantchenko, and S. Incerti, "Geant4 Electromagnetic Physics Updates", 12th Geant4 Space User's Workshop, Guildford, UK, 10-12 avril 2017
- C. Jollet, "Latest results of the Double Chooz reactor neutrino experiment", The 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NUFACT2017), Uppsala, Sweden, 25-30 septembre 2017
- B. Jurado, "Investigation of the surrogate-reaction method via the simultaneous measurement of gamma-emission and fission probabilities", INT-Workshop "Toward Predictive Theories of Nuclear Reactions Across the Isotopic Chart", Institute of nuclear Theory, Seattle, WA, USA, 27 février-1er mars 2017
- B. Jurado, "Surrogate-reaction studies, present status and perspectives", JEFF - NEEDS Workshop, OECD Conference Center, Paris, France, 24-25 avril 2017
- B. Jurado, "Nuclear decay-probability measurements at storage rings", Journées FAIR-France, IPN d'Orsay, France, 17-18 mai 2017
- B. Jurado, "Direct and indirect measurements of neutron-induced cross-sections at storage rings", 10th international conference on nuclear physics at storage rings STORI, Kanazawa, Japan, 13-18 novembre 2017
- T. Kurtukian-Nieto, "Production and beta half lives of heavy neutron-rich nuclei approaching the r-process path at N=126", KEK-Wakoshi Seminar, RIKEN Nishina Center, Wako, Japan, 5 Septembre 2017
- P. Lazarakis et al., "Investigation of Track Structure and Condensed History physics models for application in radiation dosimetry on a micro or nano scale", Geant4 User Workshop, Wollongong University, Wollongong, Australia, 19-22 septembre 2017
- S. B. Lee et al., "Geant4 modelling and experiments at the National Cancer Center", 10th TYL- 9th FKPL Joint Workshop, IPHC, Strasbourg, France, 10-12 mai 2017
- M. Lemoine-Goumard, "Detection of SN 1006 and HESS J1731-347 with Fermi-LAT: a complete view of shell-type TeV SNRs", 7th International Fermi Symposium, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 15-20 octobre 2017
- B. Lott, Présentation sur l'Astronomie Gamma dans un bar de Bordeaux dans le cadre de l'opération "A Pint of Science", 17 Mai 2017
- B. Lott, "AGNs in the Transient sky", atelier "Transient sky", LAL, Orsay, France, 20 juin 2017
- B. Lott, "Fermi Analysis" et "The Cosmax project", atelier CTA "Présentation, réduction et analyses de données", Meudon, France, 2-3 octobre 2017
- L. Maigne, et S. Incerti, "Master Projet : Modélisation du vivant sous irradiation", assemblée générale du GDR MI2B, LPC Caen, Caen, France, 7 décembre 2017
- C. Mallet et al., "Étude de l'impact des radionucléides sur la diversité microbienne autour de l'ancien site minier de Rophin (Tremplin)", Journées NEEDS-Environnement, Nantes, France, 5-6 juillet 2017
- P. Marini, "First simultaneous measurement of fission and gamma probabilities of ^{237}U (^{238}Np and ^{239}Np) via surrogate reactions", 6th Workshop on Nuclear Fission and Spectroscopy of n-rich nuclei, Chamrousse, France, 20-24 mars 2017
- C. Marquet, "Le calorimètre SuperNEMO", café labo, Gradignan, France, 2017
- C. Marquet, E. Chauveau et M. Gerbaux, "Nu et exotisme: la physique des particules s'expose", 50 ans du CENBG, Université de Bordeaux, Talence, France, 2017
- L. Mathieu, "Development of a gaseous proton-recoil detector for neutron flux measurements between 0.1 and 2 MeV neutron energy", ICNTRM international conference, Strasbourg, France, 27 août-1er septembre 2017
- A. Mereaglia, "Multi detector results from the Double Chooz experiment", Rencontres de Moriond EW, La Thuile, Italy, 18-25 mars 2017
- A. Mereaglia, "The R2D2 project", Journée Matière Sombre France 2017, Paris, France, 30 novembre 2017
- R. Ortega, "Seuils et mécanismes cellulaires de neurotoxicité de l'uranium naturel à faibles doses", Colloque PEPS FaiDoRa, Paris, France, 6 mars 2017

- R. Ortega, **"Imaging Biomaterials with X-ray Nanobeams"**, 1st Symposium on Neurodegenerative Diseases and Biostructural Imaging, Göttingen, Germany, 30-31 mai 2017
- R. Ortega, **"Evolution des techniques analytiques (in analytico): imagerie, isotopie, spectrométrie de masse"**, Séminaire Spéciation, L'évolution des espèces et des techniques d'analyse: de Darwin au synchrotron. Avignon, France, 16 juin 2017
- R. Ortega, **"Imaging Biomaterials in Neurons with X-ray Nanobeams"**, Gordon Research Conference, Cell Biology of Metals, Mount Snow, VT, USA, 23-28 juillet 2017
- R. Ortega, **"Santé et environnement, le rôle des faibles doses"**, 50 ans du CENBG, Campus Université de Bordeaux, France, 25 octobre 2017
- R. Ortega, **"Imagerie subcellulaire des métaux par faisceaux d'ions ou de rayonnement synchrotron"**, Séminaire Institut de Biosciences et Biotechnologies, Cadarache, France, 8 novembre 2017
- R. Perez, **"The surrogate-reaction method applied to ^{240}Pu "** LANL FIESTA Fission School & Workshop, Santa Fe, NM, USA, 17-22 septembre 2017
- R. Pérez Sanchez, **"Gamma-emission probabilities with stored isomeric beams"**, NucAR collaboration meeting, Gradignan, France, mars 2017
- F. Perrot, **"Precise measurement of solar oscillation parameters using the stereo-calorimetric system of JUNO"**, GDR Neutrino, Paris, France, 20-21 novembre 2017
- F. Perrot, **"How to build an ultra-pure detector"**, Journée Matière Sombre France 2017, Paris, France, 30 novembre 2017
- F. Perrot, **"L'énigme du neutrino"**, Rotary Club de Belleville-sur-Saône, France
- I. Petrović et al., **"Radiobiological validation of the Geant4-DNA simulation toolkit through evaluation of DNA DSBs"**, 5th International Conference on Radiation and Applications in various fields of research, Budva, Montenegro, 12-16 juin 2017
- E. Picard et al., **"Iron homeostasis in pathological retina: its implication and therapeutic strategy"**, 19th International Conference on Oxidative Stress Reduction, Redox Homeostasis and Antioxidants, Paris, France, 26-27 juin 2017
- F. Piquemal, **"Challenges in searches for $0\nu\beta\beta$ "**, The 2017 Tamura Symposium on Lepton and Baryon Symmetry, Austin, TX, USA, 8 mai 2017
- F. Piquemal, **"À la recherche du neutrino de Majorana"**, Congrès de la société Française de Physique, Orsay, France, juillet 2017
- F. Piquemal, **"Le Laboratoire Souterrain de Modane"**, Grenoble, France, 2017
- F. Piquemal, **"Observer l'univers sous la terre, la mer, la glace..."**, Pint of science, Bordeaux, France, 2017
- F. Piquemal, **"L'énigme du neutrino"**, CERN French Teacher school, Geneva, Switzerland, 2017
- F. Piquemal, **"Infiniment petit, infiniment grand"**, Lycée de Pons, interventions pour seconde, première et terminale, Pons, France (2017)
- M. S. Pravikoff et Richard Ortega, **"Santé et environnement. Le rôle des faibles doses"**, 50 ans du CENBG, Université de Bordeaux, Talence, France, 2017
- P. Quentin, **"Fission barriers, a microscopic approach"**, Texas A&M University, Commerce TX, USA, avril 2017
- P. Quentin, **"Nuclear Structure self-consistent Mean Fields"**, école d'été "Bridging methods in Nuclear Theory", IPHC, Strasbourg, France, 26-30 juin 2017
- P. Quentin, **"Low-energy nuclear fission"**, Bordeaux-Malaysia Winter School on Nuclear Sciences, Universiti Tenaga Nasional, Putrajaya, Malaysia, 27-29 novembre 2017
- T. Reposeur, **"Extended sources with Fermi-LAT"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), GANIL, Caen, France, 9-11 mai 2017
- D. Sakata et al., **"The Geant4-DNA and MPEXS-DNA projects at the physics-biology frontier"**, 10th TYL- 9th FKPL Joint Workshop, IPHC, Strasbourg, France, 10-12 mai 2017
- D. Sakata et al., **"Geant4-DNA Implementation of Electromagnetic Interaction Models for Proton Transportation in Gold Nanoparticle"**, Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Osaka University, Japan, 15-17 septembre 2017
- C. Sergeant et al., **"Bacterial diversity in a contaminated soil trench in Chernobyl"**, REIMEI International Workshop: Radionuclides Remediation and Clean-Up, Nantes, France, 9-10 février 2017
- C. Sergeant et al., **"Essais d'isolement de représentants cultivables d'un phylum mis en évidence par séquençage haut débit à partir d'échantillons de sols contaminés en Uranium"**, VIIIe colloque de l'AFEM, Camaret-sur-Mer, France, 17-20 octobre 2017
- C. Sergeant, **"Diversité bactérienne dans une tranchée de sol contaminé à Tchernobyl"**, Journées annuelles OASU (Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers), Arcachon, France, juillet 2017
- C. Sergeant, **"Ciné-débat sur le thème du temps et de la mémoire"**, Intervention après le Film "Into Eternity", Cinéma Utopia, Bordeaux, France, 20 janvier 2017
- C. Sergeant, D. Horlait et L. Mathieu, **"Énergie nucléaire: quels avenir pour les déchets ?"**, 50 ans du CENBG, Université de Bordeaux, Talence, France, 12 avril 2017
- H. Seznec et al., **"Journées de la Mission Interdisciplinaire du CNRS", "Défi Nano"**, Programme PROTONS, France, mars 2017
- N. Smirnova, **"The Nuclear Shell Model"**, BMinNT workshop, Strasbourg, France, 26-30 juin 2017
- N. Smirnova, **"Shell-Model study of the isospin-symmetry breaking correction to superallowed $0^+ - 0^+ \beta$ -decay"**, Int. Topic Meeting "Nuclear Structure and Reactions: Building Together for the Future", GANIL Caen, France, 9-13 octobre 2017
- D. A. Smith, **"The Sun"**, classes de physique du Lycée Camille Julien, Bordeaux, France, 1er février 2017
- D. A. Smith, **"Les nouvelles astronomies"**, Forum des Métiers, ENSCPB, Talence, France, 13 février 2017
- D. A. Smith, **"Pulsar Timing for a Balloon-borne TPC"**, atelier HARPO, École Polytechnique, Palaiseau, France, avril 2017
- D. A. Smith, **"217 Gamma-ray Pulsars with the Fermi satellite"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN). Caen, France, 11 mai 2017
- D. A. Smith, **"Particle Explorer (DAMPE)"**, International Cosmic Ray Conference (ICRC), South Korea, juillet 2017
- D. A. Smith, **"50 years of pulsars, IAU Symposium 337"**, Jodrell Bank, U. Manchester, UK, septembre 2017
- D. A. Smith, **"Les Pulsars de Fermi"**, Entretiens Pulsars, Bordeaux, France, novembre 2017
- D. A. Smith, **"Gamma-ray pulsars with Fermi"**, Cosmic Accelerators, Annapolis, USA, novembre 2017
- D. A. Smith, **"Progress on the Fermi LAT 3rd Gamma-ray Pulsar Catalog"**, Naval Research Laboratory, High Energy Astrophysics Division, Washington, DC, USA, novembre 2017
- D. A. Smith, **"Gamma-ray Pulsars with Fermi"**, 10 years of AGILE, Rome, Italy, décembre 2017
- D. A. Smith, **"Astronomie gamma" et "Les Pulsars"** pour l'Université du Temps Libre. Talence, les 14 et 21 mars 2017.
- N. Tang et al., **"Early DNA damages in a CHO cell nucleus after proton irradiation"**, 13th Neutron and Ion Dosimetry Symposium, Kraków, Poland, 14-19 mai 2017
- N. Tang et al., **"Simulation of early radiation-induced DNA damages on different types of cell nuclei"**, Prediction and Modeling of response to Molecular and External Beam Radiotherapies workshop, Manoir de Kerdréan, Le Bono, France, 20-23 septembre 2017
- M. Tarisien, **"Laser accelerated ions at high repetition rate for nuclear physics"**, ELI-NP – Université Paris-Saclay Workshop, Turnu Măgurele, Romania, 27-28 janvier 2017

M. Tarisien, **"Nuclear physics with high power lasers"**, IIA COSMA Workshop, Turnu Măgurele, Romania, 30-31 janvier 2017

M. Tarisien, **"Apports des lasers de puissance à la physique nucléaire"**, LAL, Orsay, France, 21 février 2017

M. Tarisien, **"Nuclear physics with laser-accelerated particles"**, CLPU, Salamanca, Spain, 27 avril 2017

M. Tarisien, **"Nuclear lifetime modifications in hot and dense plasmas"**, FAIR-France Workshop, Orsay, France, 17 mai 2017

M. Tarisien et al., **"Étoiles, rayonnements cosmiques et météorites"**, 50 ans du CENBG, Université de Bordeaux, Talence, France, 8 juin 2017

M. Tarisien, **"Scintillators in high-power laser-driven physics experiments"**, SCINT 2017 - 14th Int. Conference on Scintillating Materials and their Applications, Chamonix, France, 18-22 septembre 2017

I. Tsekhanovich, **"Fission of nuclei in the ^{180}Hg region"**, Ganil, France, 11 novembre 2017

M. Versteegen, **"A bright electron source in the 10-50 keV energy range for measurements of nuclear excitation cross sections"**, LPSC, Grenoble, France, 30 mai 2017

C. Villagrasa et al., **"First results on DNA clustered damage combining direct and indirect effects with Geant4-DNA"**, International conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Naples, Italy, 15-18 octobre 2017

2018

M. Aiche, **"Développement d'un détecteur à protons de recul gazeux pour des mesures précises de flux de neutrons en dessous du MeV"**, 1ères Journées Scientifiques du Neutron, Cadarache, France, 24-25 septembre 2018

S. Bakr et al., **"Latest Geant4 developments for PIXE applications"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

S. Bakr et al., **"Auger-electron cascade comparison, in Geant4 and ANU Monte Carlo model"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

S. Bakr et al., **"Latest Geant4 developments for PIXE"**, Heavy Ion Accelerator Symposium 2018, Australian National University, Canberra, Australia, 19-21 novembre 2018

S. Bakr et al., **"Auger-electron cascade comparison, in Geant4 and ANU Monte Carlo model"**, Heavy Ion Accelerator Symposium 2018, Australian National University, Canberra, Australia, 19-21 novembre 2018

P. Barberet et al., **"Études des interactions des rayonnements ionisants avec le vivant - Applications à l'étude du cancer"**, Workshop ONCOSTIM, Bordeaux, France, 28 mars 2018

P. Barberet et al., **"Études de collection de charges sur la plateforme AIFIRA"**, Journées du réseau semi-conducteurs IN2P3-IRFU, LPSC Grenoble, France, 2018

Y. Blanco et al., **"Effects of low and high energy proton radiation on the preservation of biomolecules as followed by their immunoidentification behavior"**, European Planetary Science Congress 2018, Berlin, Germany, 16-21 septembre 2018

B. Blank, **"ISOLDE - CERN's radioactive ion beam facility"**, Coordination meeting for the AGATA campaigns, GANIL, Caen, France, 22 février 2018

B. Blank, **"Cluster radioactivity studies at S3"**, S3 workshop, GANIL, Caen, France, 18-22 juin 2018

D. Bolst et al., **"Validation of Geant4 fragmentation models for therapeutic ^4He ion beams"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

C. Boredeau, **"Vertex reconstruction with the LPMT and SPMT systems in the JUNO experiment"**, 11th International Neutrino Summer School (INSS 2018), Mainz, Germany, 21 mai - 1er juin 2018

F. Brun, **"La Voie Lactée dévoilée par H.E.S.S."**, CENBG, Gradignan, France, 2 mars 2018

B. Caccia et al., **"Status of Geant4 Advanced Examples for medical applications"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

J.-C. Caillon, **"Une possible unification des forces de Newton et de Coulomb"**, Le labo parle au labo, CENBG, Gradignan, France, octobre 2018

A. Carmona, **"Micro-PIXE to image metallic compounds used in cancer treatment"**, 9th International Symposium on BioPIXE, Iguazú Falls, Brazil, 7-12 janvier 2018

C. Cerna, **"The JUNO small PMT system"**, 11th France China Particle Physics Laboratory Workshop, Marseille, France, 22-25 mai 2018

C. Cerna, **"The JUNO small PMT system"**, Workshop New and Enhanced Photosensor Technologies for Underground/underwater Neutrino Experiments (NEPTUNE), Naples, Italy, 18-21 juillet 2018

E. Chauveau (Double Chooz collaboration), **"Calibration and Energy Scale in Double Chooz, Energy Scale Calibration in Antineutrino Precision Experiments"**, Energy Scale Calibration in Antineutrino Precision Experiments (ESCAPE 2018), Heidelberg, Germany, 1er-2 juin 2018

E. Chauveau, C. Marquet, and A. Pin, **"Energy reconstruction with the SuperNEMO calorimeter"**, XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2018), Heidelberg, Germany, 4-9 juin 2018

F. Domart, **"Role of Zinc in Cytoskeleton Stability of Hippocampal Neurons"**, ESRF User's meeting, Micro-Symposium Understanding neurological diseases: Synchrotron science in a multidisciplinary approach, Grenoble, France, 5-7 février 2018, (Poster)

F. Domart, **"Development of nanoscopic correlative imaging (X-ray/photonic) to study the role of metals in synaptic plasticity and toxicity"**, 11th Young Scientist Symposium, Pessac, France, 24-25 mai 2018

A. D. Domínguez-Muñoz et al., **"Proton transport with Geant4-DNA above 100 MeV energy limit: Ionization cross sections in liquid water"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

E. Engels et al., **"Evaluation of Geant4-DNA physics models for gold nanoparticle radio-enhancement in a clinical KV X-ray radiotherapy field"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

L. de la Fuente et al., **"Modeling indirect radiation damage on DNA with the Geant4-DNA toolkit"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

J. Giovinazzo, **"ACTAR TPC: a versatile instrument for nuclear physics"**, journées réseau R&D instrumentation, Univ. Bordeaux, France, 8-9 octobre 2018

J. Giovinazzo, **"GET electronics for ACTAR TPC"**, GET workshop, Univ. Bordeaux, France, 10-12 octobre 2018

J. Giovinazzo, **"2-proton radioactivity: experiment status and perspectives"**, RESANET/GT1 meeting, IPN Orsay, France, 19-21 novembre 2018

F. Gobet, **"SPEEP: une source intense d'électrons de basse énergie extraits d'une cathode plasma en expansion"**, Journée "Nouvelles applications des lasers" du pôle ALPHA-RLH, Talence, France, 18 octobre 2018

S. Grévy, **"Does two neutron radioactivity exists? Few ideas..."**, Workshop RESANET/GT1, Orsay, France, 19-21 novembre 2018

M.-H. Grondin, **"A second look at MSH 15-52 with Fermi-LAT"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), Montpellier, France, 11-13 juin 2018

- S. Guatelli et al., **"Geant4 capability for hadron therapy"**, New Technologies in Hadron Therapy Workshop, IEEE 2018 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Sydney, Australia, 13 novembre 2018
- S. Guatelli et al., **"Recent developments of Geant4 for medical physics applications"**, IEEE 2018 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Sydney, Australia, 10-17 novembre 2018
- F. Hannachi, **"Nuclear excitations in plasma"**, Nuclear Photonics Conference 2018, Brasov, Romania, 24-29 juin 2018
- A. Henriques, **"Surrogate-Reaction Studies at the CRYRING and Solar Cells at Storage Rings"**, Annual meeting of the Nuclear Physics at Rings (NucAR) collaboration, Edinburgh, UK, 26-27 mars 2018
- A. Henriques, **"Investigation of the surrogate-reaction method through simultaneous gamma-decay and fission probability measurements"**, CNR*18 - 6th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics, Berkeley, CA, USA, september 2018
- S. Incerti et al., **"Overview of the Geant4-DNA project"**, Asan Medical Center, Seoul, South Korea, 12 janvier 2018
- S. Incerti et al., **"Geant4 low energy electromagnetic physics"**, Geant4 EM meeting, CERN, Switzerland, 26 janvier 2018
- S. Incerti et V. Falck, **"Le CoNRS"**, Journée régionale d'accueil des nouveaux entrants CNRS, Maison des Suds, Talence, France, 2 mars 2018
- S. Incerti et al., **"Overview of FKPL 2017 activities"**, 11th TYL- 10th FKPL Joint Workshop, Nara, Japan, 9-11 mai 2018
- S. Incerti et al., **"Geant4 simulations and experiments at the National Cancer center"**, 11th TYL- 10th FKPL Joint Workshop, Nara, Japan, 9-11 mai 2018
- S. Incerti et al., **"Geant4 low energy electromagnetic physics"**, 23rd Geant4 collaboration meeting, Lund U., Lund, Sweden, 27 août - 1er septembre, 2018
- S. Incerti et al., **"EAP: le master projet MOVI"**, EAP, IN2P3, France, 3 septembre 2018
- S. Incerti et al., **"Geant4 at the Physics-Medicine-Biology Frontier"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018
- S. Incerti et al., **"Monte Carlo simulation of biological damage induced by ionising radiation at the DNA scale: overview of the Geant4-DNA project"**, European Space Agency - ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 13 décembre 2018
- V. Ivantchenko, and S. Incerti, **"Highlights on version 10.4: electromagnetic physics"**, Geant4 Technical Forum, CERN, Switzerland, 17 janvier 2018
- V. Ivantchenko, and S. Incerti, **"Summary of recent patch release & 2018 work plan - EM physics part"**, Geant4 Technical Forum, CERN, Switzerland, 10 avril 2018
- B. Jurado, **"Surrogate-reaction studies at ALTO"**, Workshop on ALTO Prospects, Orsay, France, 5-7 février 2018
- B. Jurado, **"Nuclear Fission Research in France"**, China-France Joint Nuclear-Physics Symposium, GANIL, Caen, France, 10-13 avril 2018
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at storage rings"**, Workshop on Nuclear Physics at Rings and Recoil Separators, GSI Darmstadt, Germany, 13-15 mars 2018
- B. Jurado, **"Surrogate-reaction studies at storage rings"**, Annual meeting of the Nuclear Physics at Rings (NucAR) collaboration, Edinburgh, UK, 26-27 mars 2018
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at heavy-ion storage rings"**, Max-Planck Institut für Kernphysik, Heidelberg, Germany, 17 octobre 2018
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at CRYRING"**, Crying Meeting, GSI, Darmstadt, Germany, 16 novembre 2018
- B. Jurado, **"Revealing hidden regularities in nuclear fission with the GEF model code"**, Institut für Kernchemie of the University of Mainz, Germany, 17 décembre 2018
- I. Kyriakou et al., **"Influence of track structure and condensed history physics models of Geant4 to nanoscale electron transport in liquid water"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics - Medicine - Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018
- M. Lemoine-Goumard, **"Fermi-LAT detection of the massive star forming region W49A in high-energy gamma rays"**, 8th International Fermi Symposium, Baltimore, MD, USA, 14-19 octobre 2018
- B. Lott, **"Fusion de deux étoiles à neutrons et kilonova: une nouvelle ère de l'astronomie"**, Société Astronomique de Bordeaux, France, 24 janvier 2018
- B. Lott, **"Les Trous Noirs"**, dans le cadre d'une formation **"Des étoiles aux trous noirs"** pour des professeurs du secondaire, Maison de la Science, Talence, France, 15 mai 2018
- B. Lott, Atelier cosmix/cosmax, 60ème congrès de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie (UdPPC), Bordeaux, France, 30 octobre 2018
- C. Mallet et al., **"Étude de l'impact des radionucléides sur la diversité microbienne autour de l'ancien site minier de Rophin (Tremplin)"**, Atelier GdR SciNEE, Radioactivité naturelle et naturelle renforcée, Clermont-Ferrand, France, 4-5 juin 2018
- C. Mallet et al., **"Résultats du projet Tremplin"**, Atelier NEEDS-Environnement, Toulouse, France, 16-17 octobre 2018
- A. Mares, **"Étude des sources gamma HESS J1640.6-4633 et HESS J1641.0-4619: source d'accélération de rayons cosmiques de hautes énergies ?"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), Montpellier, France, 11-13 juin 2018
- A. Mares, **"Étude des sources gamma HESS J1640-465 et HESS J1641-463"**, Journée Rencontre Jeune Chercheur (JRJC), Cap Ferret, France, 14-20 octobre 2018
- C. Marquet, **"Review on Tracko-calorimeters experiments"**, Double beta decay review, Orsay, France, 2018
- C. Marquet, **"Mesures basses radioactivités au CENBG"**, Rencontre radioisotopes pour la médecine - Hôpital Bergonié, Bordeaux, France, 15 mai 2018
- C. Marquet, **"Dosimétrie et localisation de radioisotopes avec la plateforme PRISNA"**, Rencontre radioisotopes pour la médecine - Hôpital Bergonié, Bordeaux, France, 15 mai 2018
- C. Marquet, **"The SuperNEMO experiment"**, Double-Beta Research in France Workshop, Laboratoire APC, Paris, France, 4 septembre 2018
- C. Marquet, **"LiquidO double beta experiment"**, The International Blaise Pascal Chair (BPC LiquidO Workshop), Laboratoire APC, Paris, France, 6-7 décembre 2018
- C. Marquet, **"À la poursuite des neutrinos"**, Carnets de Science, CNRS Editions, automne-hiver 2018
- L. Mathieu, **"Development of a Gaseous Proton-Recoil Detector for neutron flux measurements between 0.2 and 2 MeV neutron energy"**, Workshop Détecteurs Gazeux, Bordeaux, France, 8-9 octobre 2018
- L. Mathieu, **"Development of a Gaseous Proton-Recoil Detector for neutron flux measurements between 0.2 and 2 MeV neutron energy"**, WONDER international workshop, Aix-en-Provence, France, 8-12 octobre 2018
- A. Mereaglia, **"GENIE: Neutrino Monte-Carlo Generator"**, café labo, Gradignan, France, 16 janvier 2018
- A. Mereaglia, **"ENUBET: Enhanced Neutrino BEams from kaon Tagging"**, 30èmes Rencontres de Blois - Particle Physics and Cosmology, Blois, France, 3-8 juin 2018
- A. Mereaglia, **"Status of the R2D2 Project"**, Double-Beta Research in France Workshop, Laboratoire APC, Paris, France, 4 septembre 2018
- A. Mereaglia, **"The R2D2 Project"**, GET workshop, Bordeaux, France, 10-12 octobre 2018
- G. Montavon et al., **"The Rophin site in France - A place to conduct interdisciplinary research on NORM/TeNORM-related issues"**, 3rd European Radiological Protection Research Week, Rovinj-Rovigno, Croatia 1er-5 octobre 2018

- L. Mouawad et al., **"Total cross sections for the ionization of biological molecules by single electron impact"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics – Medicine – Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018
- S. Okada et al., **"Optimization of GPU-based Monte Carlo simulator for radiation physics at DNA scale"**, 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology, Muroran City, Hokkaido, Japan, 18-20 septembre 2018
- S. Okada et al., **"A GPU-based Monte Carlo simulator "MPEXS" and its extension"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics – Medicine – Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018
- R. Ortega, **"Contribution of micro-PIXE imaging to understand the mechanisms of uranium neurotoxicity"**, 9th International Symposium on BioPIXE, Iguazú Falls, Brazil, 7-12 janvier 2018
- R. Ortega **"Imaging Biometals in Neurons with X-ray Nanobeams"**, ESRF User's meeting. Micro-Symposium Understanding neurological diseases: Synchrotron science in a multidisciplinary approach, Grenoble, France, 5-7 février 2018
- R. Ortega, **"Nano-chemical imaging of biometals in sub-synaptic compartments"**, French-BIC, Groupe français de chimie bioinorganique, Carry-le-Rouet, France, 14-17 octobre 2018
- R. Perez Sanchez, **"The surrogate-reaction method applied to ^{240}Pu "** Final CHANDA Meeting, Madrid, Spain, 16-20 avril 2018
- V. Petković et al., **"DMSO pre-treatment of MCF-7 breast cancer cells for evaluation of the effects of gamma rays and carbon ions"**, Challenges in Redox Biology conference, Belgrade, Serbia, 28-30 septembre 2018
- F. Perrot, **"Low background challenges in the JUNO experiment"**, 11th France China Particle Physics Laboratory Workshop, Marseille, France, 22-25 mai 2018
- F. Perrot, **"Radioactive background control for the JUNO experimental setup"**, XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2018), Heidelberg, Germany, 4-9 juin 2018
- F. Perrot, **"Status and physics potential of the JUNO experiment"**, 6th Symposium on Prospects in the Physics of Discrete Symmetries (DISCRETE18), Vienna, Austria, 26-30 novembre 2018
- A. Pin, **"Étude de la nature du neutrino via la décroissance double-bêta sans émission de neutrino du ^{82}Se avec le détecteur SuperNEMO ; caractérisation et optimisation du calorimètre du démonstrateur"**, Ma thèse en 180 secondes, Université de Bordeaux, 2018
- F. Piquemal, **"Modane Underground Laboratory"**, RAS Council of heavy-ion physics meeting on SHE research, Dubna, Russia, 26-27 octobre 2018
- F. Piquemal, **"Modane Underground Laboratory and related activities"**, JINR Dubna, Russia, 2018
- F. Piquemal, **"L'énigmatisme neutrino"**, CERN French Teacher school, Genève, Suisse (2018)
- F. Piquemal, **"Infiniment petit, infiniment grand"**, Lycée de Pons, interventions pour seconde, première et terminale, Pons, France (2018)
- F. Porcaro, **"Uranium distribution in human dopaminergic cells imaged by means of synchrotron XRF with 300 nm spatial resolution"**, 1ères Journées d'Etude de la Chimie sous Rayonnement et de la Radiochimie, Strasbourg, France, 27 mai - 1er juin 2018
- M. S. Pravikoff, **"Fukushima's Nuclear Imprint Is Found In California Wine (Drinkers, Don't Panic)"**, entretien avec Mihir Zaveri, New York Times, édition de New York, p. A15, 21 juillet 2018
- M. S. Pravikoff, **"California wines contain Fukushima radiation, and it's not a bad thing"**, entretien avec Dr. Amanda Grennell, PBS NewsHour, 24 juillet 2018
- P. Quentin, **"Basic concepts about nuclear reactions"**, Bordeaux-Malaysia Winter School on Nuclear Sciences, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia, 26-28 novembre 2018
- P. Quentin, **"Des scientifiques au cœur de la seconde guerre mondiale, engagements et dilemmes de R. Oppenheimer et W. Heisenberg"**, Journée d'études "Éthique et utilisation des avancées scientifiques et techniques", ICES, La Roche-sur-Yon, France, 8 février 2018
- D. Sakata et al., **"Simulation of dose enhancement around gold-nanoparticles: The importance of electron discrete models in nanometer volumes"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics – Medicine – Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018
- D. Sakata et al., **"Evaluation of ionizing radiation induced early DNA damage on a cell nucleus by integrated track structure Monte Carlo simulations using Geant4-DNA"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics – Medicine – Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018
- D. Sakata et al., **"Geant4-DNA track-structure simulations IN gold nanoparticles, IEEE 2018 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging"** Conference, Sydney, Australia, 10-17 novembre 2018
- M. Sánchez Sánchez, **"Searching for the Proper Power Counting in Chiral Effective Field Theory"**, International conference "Nuclear Theory in the Supercomputing Era", Daejeon, South Korea, 29 octobre-2 novembre 2018
- C. Sergeant, **"Quand des bactéries peuvent nous aider à décontaminer des sols: un voyage de Tchernobyl au laboratoire de recherches..."**, Pint of Science, café-restaurant, Bordeaux, France, 15 mai 2018
- C. Sergeant, D. Horlait, et L. Mathieu, **"Énergie nucléaire: quels avenir pour les déchets ?"**, Le labo parle au labo, CENBG, Gradignan, France, 15 juin 2018
- C. Sergeant, F. Piquemal, M. Aiche, L. Mathieu, C. Cerna, **"Intervention dans la table ronde après l'intervention de Mr Fontana (Framatome), « Innovation et Industrie au service de la filière nucléaire »"**, SFEN-CENBG, Gradignan, France, 20 septembre 2018
- H. Seznec et al., **"Interactions Rayonnements ionisants et Biologie"**, Journées de prospectives de l'oncosphère de Bordeaux. Workshop STIM "Sciences, Technologies, Imagerie et Modélisation", France, 28 mars 2018
- H. Seznec et al., **"Développement d'un outil de modélisation de la dose pour l'étude de la réponse au stress radio-induit chez Caenorhabditis elegans"**, Atelier NEEDS – Environnement – Toulouse, 15 octobre 2018
- H. Seznec et al., **"Microsondes nucléaires et Sciences du Vivant. Applications à l'étude des conséquences cellulaires et moléculaires nano- et radio-induites"**, IRFU-CEA-Saclay, France, 13 novembre 2018
- H. Seznec et al., **"Microsondes nucléaires et Sciences du Vivant. Applications à l'étude des conséquences cellulaires et moléculaires nano- et radio-induites"**, CEA IRFU DEDIP - CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, France, 12 décembre 2018
- W.-G. Shin et al., **"Development of a new electron elastic scattering model for Geant4-DNA using ELSEPA for liquid-phase water"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics – Medicine – Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018
- N. Smirnova, **"New microscopic sd-shell interactions from the no-core shell model"**, Nuclear Structure and Reactions for the 2020s Workshop, GANIL Caen, France, 2-6 juillet 2018
- N. Smirnova, **"Microscopic effective interactions for the sd shell from the No-Core Shell Model"**, GDR RESANET GT3, CEA/IRFU, Orme-des-Merisiers, France, 12-13 novembre 2018
- D. A. Smith, **"I Pulsars en raggi gamma con le LAT di Fermi"**, Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica cosmica Milano (INAF IASF) et Università degli Studi di Milano, Milan, Italy, janvier 2018
- D. A. Smith, **"The Battle of the Bulge"** (Les pulsars gamma de Fermi et la matière noire), NUI Galway, Ireland, février 2018
- D. A. Smith, **"The Battle of the Bulge"** (Les pulsars gamma de Fermi et la matière noire), University College Dublin, Ireland, février 2018
- D. A. Smith, **"The Battle of the Bulge"** (Les pulsars gamma de Fermi et la matière noire), INTEGRAL Science Data Center (ISDC), Université de Genève, Switzerland, mars 2018
- D. A. Smith, **"250 Gamma-ray Pulsars with the Fermi satellite"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), Montpellier, France, 11-13 juin 2018

D. A. Smith, **"Faint Gamma Ray Pulsars"**, Journées SF2A (Soc. Française d'Astro et Astrophysique), Bordeaux, France, juillet 2018

N. Tang et al., **"Influence of chromatin compaction on early radiation-induced DNA damage"**, 15th International Workshop on Radiation Damage to DNA, Aussois, France, 28 mai–1er juin 2018

N. Tang et al., **"Influence of chromatin compaction on simulated early radiation-induced DNA damage using Geant4-DNA"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics–Medicine–Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

M. Tarisien, **"Interaction laser-jets de gaz denses et production de radio-isotopes"**, Workshop sur l'accélération d'ions par laser et la production de radio-isotopes, Bordeaux, France, 15 mai 2018

M. Tarisien, (Présentation Invitée), **"Accélération d'ions avec des jets denses"**, 9ème Forum ILP, Saint-Pierre d'Oléron, France, 10-15 juin 2018

M. Tarisien, **"What kind of nuclear physics experiments with high power lasers ?"**, GSI, Darmstadt, Germany, 23 octobre 2018

E. Torfeh et al., **"Correlating microdosimetric simulations with in cellulo radiation-induced spatiotemporal dynamics of GFP-tagged DNA repair proteins"**, 2018 Geant4 International User Conference at the Physics – Medicine – Biology frontier, Bordeaux, France, 29-31 octobre 2018

I. Tsekhanovich, **"Fission properties of nuclei in the ^{180}Hg region"**, 15th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, Italy, 11-15 juin 2018

I. Tsekhanovich, **"Deduction of low-energy fission properties from cross section measurements"**, UKM-University of Bordeaux winter school on Nuclear Science and Technology, UKM, Sengalor, Malaysia, 26-28 novembre 2018

C. Villagrasa et al., **"Calcul des cassures double-brin de l'ADN radioinduites avec Geant4-DNA"**, workshop "codes de calculs en radioprotection" de la Société Française de Radioprotection, Musée Peugeot, Sochaux, France, 1-2 février 2018

C. Villagrasa et al., **"Modeling indirect radiation damage on DNA with the Geant4-DNA toolkit"**, 15th International Workshop on Radiation Damage to DNA, Aussois, France, 28 mai–1er juin 2018

2019

F. Acero, J. Ballet, and J. Devin, **"X-ray and gamma-ray emission of RX J1713.7-3946"**, SNR II: an Odyssey in Space after stellar death, Chania (Crete), Greece, 3-8 juin 2019

A. Ahmed et al., **"Status of the Geant4 advanced examples for medical applications"**, International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy and the International Conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Montréal, Canada, 17-21 juin 2019

P. Arce et al., **"G4_MED: a Geant4 benchmarking and regression testing suite for medical physics applications in the geant-val environment"**, ENSAR2 Workshop on Geant4 in Nuclear Physics, Madrid, Spain, 24-26 avril 2019

P. Arce et al., **"G4_MED: a Geant4 benchmarking and regression testing suite for medical physics applications in the geant-val environment"**, International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy and the International Conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Montréal, Canada, 17-21 juin 2019

P. Ascher, **"Trap-based experiments: scientific program and perspectives"**, ISOL-France Meeting, Nantes, France, 24-25 janvier 2019

S. Bakr et al., **"First study on the validation of Geant4 Auger electron emission"**, International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy and the International Conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Montréal, Canada, 17-21 juin 2019

S. Bakr et al., **"Recent developments in Geant4 for PIXE applications"**, 24th International Conference on Ion Beam Analysis, Antibes, France, 13-18 octobre 2019

P. Barberet et al., **"Charged-particle microbeams applied to life science"**, Séminaire à l'Université de Namur, Belgium, novembre 2019

B. Blank, **"Weak-interaction studies with nuclear beta decay"**, Top Row CKM Unitarity Workshop, Texas A&M University, College Station, TX, USA, 7-8 janvier 2019

B. Blank, **"Résumé des activités du CSI IN2P3 pour 2015-2018"**, Réunion du CSI IN2P3, Paris, France, 18 janvier 2019

B. Blank, **"One- and two-proton emission from ground and excited states"**, PROCON 2019, MSU East Lansing, MI, USA, 3-7 juin 2019

B. Blank, **"Scalar current limits from the new beta-neutrino correlation experiment WISArD"**, INPC 2019, Glasgow, UK, 29 juillet–2 août 2019

D. Bolst et al., **"Validation of Geant4 fragmentation models for therapeutic ^4He ion beams"**, International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy and the International Conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Montréal, Canada, 17-21 juin 2019

J.-C. Caillon, **"Les voyages interstellaires entre rêve et réalité"**, Association Universitaire d'Astronomie, Université de Bordeaux, France, 7 mars 2019

J.-C. Caillon, **"À la recherche de l'antimatière"**, nuit de L'antimatière SFP, France, 1er avril 2019

A. Carmona, **"SLC30A10 mutation involved in Parkinsonism results in manganese accumulation in Golgi vesicles revealed by synchrotron XRF nano-imaging"**, ESRF User Meeting, Symposium: X-ray microscopy in biology: recent applications, challenges and opportunities, Grenoble, France, 4-6 février 2019

A. Carmona, **"SLC30A10 mutation involved in parkinsonism results in manganese accumulation within nano-vesicles of the Golgi apparatus revealed by synchrotron X-ray fluorescence imaging"**, 58th Annual Meeting of the Society of Toxicology, Baltimore, MD, USA, 10-14 mars 2019, (Poster)

A. Carmona, **"SLC30A10 mutation involved in parkinsonism results in manganese accumulation within nano-vesicles of the Golgi apparatus revealed by synchrotron X-ray fluorescence imaging"**, Cell Biology of Metals Gordon Research Conference, Castelldefels, Spain, 14 - 19 juillet 2019, (Poster)

C. Cerna, **"Besoins et Fonctionnalité en ingénierie système"**, Action Nationale de Formation CNRS "Ingénierie Système pour les grands instruments", Observatoire de Haute-Provence, France, 4-7 février 2019

C. Chatel, **"High precision measurement of the ^{242}Pu neutron-induced fission cross section"**, Joliot-Curie School 2019, Orsay, France, 22-27 septembre 2019, (Poster)

C. Chatel, **"DéTECTEUR gazeux à protons de recul (DGPR)"**, Mécanique des détecteurs et systèmes similaires 2019, Orsay, France, 7-8 octobre 2019, (Poster)

J. Devin, **"Is G150.3+4.5 old or one of the closest GeV gamma-ray SNRs ?"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), Orléans, France, 8-10 avril 2019

J. Devin, and M. Lemoine-Goumard, **"Constraining the nature of the unidentified sources HESS J1427-608 and HESS J1458-608"**, CTA Symposium, Bologna, Italy, 6-9 mai 2019

J. Devin, M. Lemoine-Goumard, and M.-H. Grondin, **"High-energy study of a new TeV SNR in the CTA era: G150.3+4.5"**, CTA Symposium, Bologna, Italy, 6-9 mai 2019

J. Devin, M. Lemoine-Goumard, and M.-H. Grondin, **"Fermi-LAT observations of the surprising SNR G150.3+4.5"**, SNR II: an Odyssey in Space after stellar death, Chania (Crete), Greece, 3-8 juin 2019

J. Devin, **"Chasing Galactic cosmic-ray sources with gamma rays"**, 14th CNRS thematic School of Astroparticle Physics, OHP Saint Michel l'Observatoire, France, 25-30 novembre 2019

F. Domart, **"Development of nanoscopic correlative imaging (X-ray/photonic) to study the role of metals in the neuronal cytoskeleton"**, NeuroFrance, Marseille, France, 22-24 mai 2019, (Poster)

F. Domart, **"Correlating Super Resolution Microscopy with Synchrotron X-Ray Fluorescence Imaging to Study Metal Functions in Neuronal Cells"**, Gordon research Seminar: Cell Biology of Metals, Castelldefels, Spain, 13-14 juillet 2019

- F. Domart, **"Nanoscope Correlative Imaging (X-ray/photonic): A New Method to Study the Role of Metals in neuronal cytoskeleton and plasticity"**, Cell Biology of Metals Gordon Research Conference, Castelldefels, Spain, 14-19 juillet 2019, (Poster)
- F. Domart, **"Correlating Super Resolution Microscopy with Synchrotron X-ray Fluorescence Imaging to Study Metal Functions in Neuronal Synapses"**, Workshop: Quelques défis scientifiques à la lumière des synchrotrons de 4ème génération, Paris, France, 16-17 septembre 2019, (Poster)
- A. D. Domínguez-Muñoz et al., **"Modelling ionization and excitation cross sections of proton interaction with liquid water in Geant4-DNA above 100 MeV"**, International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy and the International Conference on Monte Carlo Techniques for Medical Applications, Montréal, Canada, 17-21 juin 2019
- J. Giovinazzo, **"ACTAR TPC, a new gas detector for nuclear physics"**, Workshop on Gas-filled Detectors and Systems / ENSAR GDS, IPN Orsay, France, 23-25 janvier 2019
- J. Giovinazzo, **"^{2p} radioactivity of ⁶⁷Kr"**, Mazurian Lakes Conference 2019, Piaski, Poland, 1-7 septembre 2019
- S. Grévy, **"GANIL: present and short-term activities of cyclotrons"**, Présentation Conseil Scientifique IN2P3, Paris, France, 26 juin 2019
- S. Grévy, **"Concluding remarks"**, XXIth Colloque GANIL, Strasbourg, France, 9-13 septembre 2019
- S. Grévy, **"Nuclear reactions at GANIL: From astrophysics to nuclear medicine"**, FASIC workshop, Canberra, Australia, 3-5 novembre 2019
- S. Grévy, **"Experimental study of the N=20 and N=28 shell closures"**, ANU, Canberra, Australia, 6 novembre 2019
- M.-H. Grondin, **"Gamma-ray observations of PWNe"**, Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar Death, Chania (Crete), Greece, 3-8 juin 2019
- J. L. Henares, **"Gas jet targets for laser-driven ion acceleration"**, TARG4:4th Targetry for High Repetition Rate Laser-Driven Sources Workshop, Milan, Italy, 11 juin 2019
- J. L. Henares, **"Gas jet targets for laser-driven ion acceleration: status"**, Journées du GdR APPEL, Palaiseau, France, 9 septembre 2019
- J. L. Henares, **"Utilisation de jets de gaz denses pour accélérer des ions par laser"**, CENBG, Gradignan, France, 15 novembre 2019
- J. L. Henares, **"Accélération d'ions par interaction laser-plasma sur un jet de gaz dense"**, Workshop cibles du GdR APPEL, Orsay, France, 20 novembre 2019
- A. Henriques, **"Surrogate-Reaction Studies at the CRYRING"**, NucAR Collaboration Meeting, Heidelberg, Germany, 7-8 mars 2019
- A. Henriques, **"Present and future investigations using the surrogate-reaction method"**, Sakura-2019 ASRC International Workshop "Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei", Tokai, Japan, 25-27 mars 2019
- A. Henriques, **"Future Fission Studies in Inverse Kinematics at Storage Rings"**, ISOLDE Solenoidal Spectrometer Workshop, Liverpool, UK, 27-29 August 2019
- A. Henriques, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at storage rings"**, IX International Conference on Nuclear Physics in Astrophysics, Schloß Waldthausen, Germany, 17-20 septembre 2019
- S. Incerti et al., **"Overview of FKPL 2018 activities"**, 12th TYL- 11th FKPL Joint Workshop, Jeju, South Korea, 8-10 mai 2019
- S. Incerti et al., **"Geant4-DNA: proximity functions – the new « microprox » extended example"**, 24th Geant4 collaboration meeting, Jefferson Lab., Newport News, VA, USA, 23-27 septembre 2019
- V. Ivantchenko, and S. Incerti, **"Developments for 2019: EM physics"**, Geant4 Technical Forum, CERN, Switzerland, 29 mars 2019
- V. Ivantchenko, and S. Incerti, **"Geant4 electromagnetic physics report"**, 24th Geant4 collaboration meeting, Jefferson Lab., Newport News, VA, USA, 23-27 septembre 2019
- C. Jollet, **"Double Chooz results and observation with null nuclear power"**, Technical Meeting on Nuclear Data for Anti-neutrino spectra and their applications, IAEA Vienna, Austria, 23-26 avril 2019
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at storage rings"**, NUSTAR Annual Meeting 2019, GSI, Germany, 25 février - 1er mars 2019
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at storage rings"**, NucAR Collaboration Meeting, Heidelberg, Germany, 7-8 mars 2019
- B. Jurado, **"Nuclear physics at GSI/FAIR"**, Scientific Council of the IN2P3, Paris, France, 26 juin 2019
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron cross sections of short-lived nuclei"**, CEA Saclay, France, 5 juillet 2019
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at the CRYRING"**, 16th SPARC Topical Workshop, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Germany, 8-13 septembre 2019
- B. Jurado, **"Indirect measurements of neutron-induced cross sections at storage rings"**, NUSTAR Week 2019, Gif-sur-Yvette, France, 23-27 septembre 2019
- O. Keta et al., **"Radiobiological study of different human cancer cell lines exposed to 4He ion beam"**, International Congress of Radiation Research, Manchester, UK, 25-29 août 2019
- I. Kyriakou et al., **"Microdosimetry with Geant4 for Quality Factor estimates"**, 14th Geant4 Space User's Workshop, Xylokastro (Corinthia), Greece, 21-23 octobre 2019
- S. B. Lee, and S. Incerti, **"Geant4 simulations and experiments at the National Cancer center"**, 12th TYL- 11th FKPL Joint Workshop, Jeju, South Korea, 8-10 mai 2019
- M. Lemoine-Goumard, A. Mares, and M.-H. Grondin, **"Efficient particle acceleration from HESS J1640.6-4633 and the PeVatron candidate"**, HESS J1641.0-4619, Supernova Remnants II, 2019, Chania (Crete), Greece, 3-8 juin 2019
- M. Lemoine-Goumard, **"Anisotropies in the gamma-ray emission of supernova remnants"**, Anisotropies in core-collapse supernova explosions, Palermo, Italy, 21-23 octobre 2019
- B. Lott, **"Détection de l'ombre d'un trou noir par l'EHT"**, Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (avec Alain Baudry), Pessac, France, 14 mai 2019
- B. Lott, **"L'astrophysique des hautes énergies vue par Fermi"** et présentation sur COSMIX, Laboratoire Subatech, Nantes, France, 28 mai 2019
- B. Lott, **"Les Trous Noirs"**, dans le cadre d'une formation "Des étoiles au trous noirs" pour des professeurs du secondaire, Maison de la Science, Talence, France, 4 juin et 17-18 octobre 2019
- B. Lott, **"Les Trous Noirs dans l'Univers"**, Association Universitaire d'Astronomie de l'Université de Bordeaux, Talence, France, 12 décembre 2019
- Mallet et al., **"Étude de l'impact des radionucléides sur la diversité microbienne autour de l'ancien site minier de Rophin (Tremplin)"**, Atelier GDR SciNEE: ZATU et projets structurants, Nantes, France, 24-25 avril 2019
- A. Mares, **"Efficient particle acceleration from HESS J1640.6-4633 and the PeVatron candidate HESS J1641.0-4619"**, atelier Neutrons stars and their environments (MODE-SNR-PWN), Orléans, France, 8-10 avril 2019
- A. Mares, **"Efficient particle acceleration from HESS J1640-465 and the PeVatron candidate HESS J1641-463"**, International Cosmic Ray Conference (ICRC), Madison, WI, USA, 24 juillet-1er août 2019
- C. Marquet, **"SuperNEMO: a unique tracking approach for DBD studies"**, GDR Neutrino meeting, Gradignan, France, 29-30 octobre 2019
- A. Mereaglia, **"A new neutrinoless double-beta decay experiment: R2D2"**, Low Radioactivity Techniques 2019 workshop (LRT 2019), Canfranc, Spain, 19-23 mai 2019
- R. Ortega, **"Correlative X-ray fluorescence nano-imaging and optical microscopy to investigate chemical element compartmentalization in cells"**, 14th Soleil Users' Meeting, Gif-sur-Yvette, France, 17-18 janvier 2019

R. Ortega, **"X-ray fluorescence imaging reveals mechanisms of manganese accumulation in parkinsonism"**, 9th Workshop on X-Ray Nano-Imaging of Biological and Chemical Systems at PETRA III, Hambourg, Germany, 23-25 janvier 2019

R. Ortega, **"Panorama des méthodes d'imagerie cellulaire des métaux"**, Colloque Métallo-Mix, Les éléments métalliques: un trait d'union entre les sciences, Paris, France, 3-4 octobre 2019

F. Perrot, **"Advantages and sensitivity of UV fs laser ablation HR-ICPMS technique for rare event experiments"**, Low Radioactivity Techniques 2019 workshop (LRT 2019), Canfranc, Spain, 19-23 mai 2019

V. Petković et al., **"Response of non-small lung cancer cells to proton and carbon ions"**, International Congress of Radiation Research, Manchester, UK, 25-29 août 2019

F. Piquemal, **"Angular measurement with NEMO3/SuperNEMO"**, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, Sendai, Japan, 7-9 mars 2019

F. Piquemal, **"La matière noire dans l'Univers"**, Jalle astronomie, Martignas-sur-Jalle, France, 2019

F. Piquemal, **"L'énigmatisme neutrino"**, CERN French Teacher school, Geneva, Switzerland, 2019

F. Piquemal, **"Infiniment petit, infiniment grand"**, Lycée de Pons, interventions pour seconde, première et terminale, Pons, France (2019)

P. Puyuelo-Valdes, **"Laser driven ion acceleration in high density gas jets"**, SPIE Optics + Optoelectronics 2019 conference, Prague, Czech Republic, 1er avril 2019

P. Puyuelo-Valdes, **"Laser driven proton acceleration in high density gas jets"**, workshop Appel-i, Gradignan, France, 19 juin 2019

P. Quentin **"Un exemple de bouleversement de notre compréhension du monde physique: l'émergence de la mécanique quantique à partir de la mécanique classique, 1900-1926"**, Colloque "Émergence", ICES, La roche sur Yon, France, 22-23 mars 2019

P. Quentin, **"Emergence of a new theory, the case of quantum mechanics, 1900-1926"**, séminaire à Saint Thomas University, Houston TX, USA, 17 octobre 2019

P. Quentin, **"Symmetries in the many-body problem"**, Bordeaux-Malaysia Winter School on Nuclear Sciences, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Skudai, Malaysia, 10-12 décembre 2019

P. Quentin, **"How to write (or not to write) a scientific paper"**, séminaire à Hue University, Hue, Vietnam, 15 décembre 2019

T. Ribette et al., **"Study of liquid chromatography exposed to spatial conditions: effect of radiation and temperature on the stationary phase"**, World Chemistry Congress IUPAC 2019, Paris, France, 5-12 juillet 2019

A. Ristic-Fira, I. Petrovic, and S. Incerti, **"Impact of Charged Particle Exposure on DNA Double-Strand Break Generation in Human Cancer Cells"**, NUSPRASEN workshop on Nuclear Science Applications, Helsinki, Finland, 25-27 novembre 2019

D. Sakata et al., **"Electron track structure simulations in a gold nanoparticle using Geant4-DNA"**, International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy and the International Conference on Monte-Carlo Techniques for Medical Applications, Montréal, Canada, 17-21 juin 2019

M. Sánchez Sánchez, **"Improved Description of Light Nuclei through Chiral Effective Field Theory"**, Nuclear Structure and Reactions for the 2020s Int. workshop, GANIL, Caen, France, 18-22 mars 2019

M. Sánchez Sánchez, **"Improved Description of Light Nuclei through Chiral Effective Field Theory and the No-Core Shell Model"**, Effective Field Theories and Ab Initio Calculations of Nuclei workshop, University of Nanjing, China, 10 avril 2019

M. Sánchez Sánchez, **"Improved Description of Light Nuclear Structure through Chiral Effective Field Theory"**, Program "Nuclear Structure at the Crossroads", Institute for Nuclear Theory, Seattle, WA, USA, 9 juillet 2019

M. Sánchez Sánchez, **"Effective Field Theories in Nuclear and Hadronic Physics"**, seminar at the Department of Physics and Astronomy at the Iowa State University, Ames, IA, USA, 25 juillet 2019

J. Schuemann et al., **"TOPAS-nBio: Modeling effects of radiation with nanometer-scale Monte Carlo simulations"**, APS 2018 Meeting, Boston MA, USA, 4-8 mars 2019

J. Schuemann et al., **"TOPAS-nBio: A Monte Carlo simulation toolkit for nanometer-scale radiobiology"**, American Association of Physicists in Medicine 2019, San Antonio, TX, USA, 14-28 juillet 2019

J. Schuemann et al., **"The TOPAS-nBio project: Results of 4-years developing a Monte Carlo simulation toolkit for nanometer-scale radiobiology"**, 65th Annual International Meeting, Radiation Research Society, San Diego, CA, 3-6 novembre 2019

C. Sergeant, M.-H. Vesvres et G. Holub, **"Premiers résultats à Rophin et pour les sources naturelles du projet TIRAMISU"**, Atelier GDR SciNEE: ZATU et projets structurants, Nantes, France, 24-25 avril 2019

W.-G. Shin et al., **"Evaluation of the influence of physical and chemical parameters on water radiolysis simulations under MeV electron irradiation using Geant4-DNA"**, 24th Geant4 collaboration meeting, Jefferson Lab., Newport News, VA, USA, 23-27 septembre 2019

N. Smirnova, **"New ab-initio effective interactions for the sd shell"**, Joint LIA COLL-AGAIN, COPIGAL, and POLITA Workshop "Nuclear Theories", Warsaw, Poland, 4-7 mars 2019

—N. Smirnova, **"Anatomy of TBMEs of microscopic and phenomenological sd-shell interactions"**, Nuclear Structure and Reactions for the 2020s Intl. workshop, GANIL, Caen, France, 18-22 mars 2019

M. Tarisien, **"Détection de particules en milieu laser de puissance"**, workshop Resanet Astro Physique Nucléaire avec des lasers de puissance, Orsay, France, 12 juin 2019

M. Tarisien, **"Formation de radio-isotopes par accélération laser-plasma"**, workshop Appel i, Gradignan, France, 19 juin 2019

M. Tarisien, **"Accélération d'ions par l'interaction d'un laser de puissance avec un jet de gaz de haute densité"**, Journées Accélérateurs 2019 de la SFP, Roscoff, France, 3 octobre 2019

M. Tarisien, **"Cibles utilisées pour l'accélération d'ions par interaction laser-plasma"**, Workshop cibles du GdR APPEL, Orsay, France, 20 novembre 2019

I. Tsekhanovich, **"Fission modes in ^{178}Pt "**, Sakura-2019 ASRC International Workshop on Nuclear Fission and Structure of Exotic Nuclei, Tokai, Japan, 25-27 mars 2019

M. Versteegen, **"WISArD: Weak Interaction Studies with ^{32}Ar Decay"**, PSI2019, Villigen, Switzerland, 20-25 octobre 2019, (Poster)



©Priscilla DU PREZ from Unsplash

COMPÉTENCES ET RÉALISATIONS TECHNIQUES

ACTIVITÉS DES SERVICES

- 141 Administration-Campus-Communication&Formation
- 149 Électronique et Acquisition
- 157 Informatique
- 163 Instrumentation et Détecteurs
- 171 Mécanique
- 179 Radioprotection

PLATEFORMES ET TRANSFERT

- 183 AIFIRA
- 189 PIAGARA
- 195 PRISNA
- 201 ARCANE | PRISNA Prestations
- 205 Laboratoire commun P2R

A top-down view of a wooden desk. In the bottom right, a silver laptop is open, showing its keyboard. In the bottom left, a white spiral-bound notebook is open. A black pen with silver accents lies diagonally across a yellow sticky note. A small green plant is in the top left corner. A calendar page with the date '25 Tuesday' is partially visible at the top.

ADMINISTRATION CAMPUS COMMUNICATION & FORMATION

ABSTRACT

The "Administration-Campus Communication&Training" service provides a major administrative and financial support to the technical services' and research teams' activities. Hence, this service has a key role in the laboratory organisation by ensuring the staff administrative management, the budget, contractual and financial laboratory management as well as the site's infrastructure management. The team gathers 11 people shared in 3 poles: the "Administrative and financial" pole, the "Communication&Training" pole and the "Campus" technical pole.

Since September 2018 and the new laboratory direction, the scientific organisation has been reviewed and 3 research poles and one technical pole has been created. To take into account this new organisation, the service has affected a financial assistant to each research pole and to technical services to ensure the financial management with the budget manager's support. To have a single administrative management and human resources entry point for all laboratory members, these activities remain executed by the direction secretariat.

A new "Communication&Training" pole has been created to implement many necessary actions to highlight the laboratory's picture as well as its scientific activities and its technical achievements and also to get a better visibility. Training is important and essential for the laboratory's members: it allows them to keep acquiring new skills and this is ensured by this pole.

On the other hand, the "Campus" technical pole ensures logistics, the upkeep of the 12 hectare park, the vehicle maintenance, the necessary work -including maintenance- for the general functioning of our buildings, representing a surface area of 6 300 m². It is also involved in the site's infrastructure evolution with the future construction of the CREATIF building whose delivery is scheduled for 2021, and the site's main building renovation with its environment (creation of a living area, refectory, construction of a geothermal boiler, etc.). For these two separated operations, a first CPER was obtained for the period of 2015-2020 for CREATIF and a new CPER will be filed in the coming months for the period of 2021-2027 for main building's renovation "le Château" and its environment.

The service works in close collaboration with the Aquitaine Regional Delegation, the University of Bordeaux and the IN2P3. Thus, it is the first link in the management chain and the tutorship's interlocutor. The laboratory has been a Financial management Delegation in the CNRS since 2011.

RÉSUMÉ

Le service "Administration-Campus-Communication&Formation" apporte un soutien administratif et financier majeur aux activités des équipes de recherche et des services techniques. Le service joue un rôle clé dans l'organisation du laboratoire en assurant la gestion administrative des personnels, la gestion budgétaire, contractuelle et financière du laboratoire, ainsi que la gestion de l'infrastructure du site. Il est composé de 11 personnes réparties en 3 pôles : le pôle "Administratif et financier", le pôle technique "Campus" et le pôle "Communication&Formation".

Depuis septembre 2018, avec l'arrivée de la nouvelle direction du laboratoire, l'organisation scientifique du laboratoire a été revue avec la création de 3 pôles de recherche, d'un pôle technique et d'un pôle "Administration-Campus-Communication&Formation". Le service a répondu à cette réorganisation en affectant une gestionnaire financière dans chaque pôle de recherche et dans les services techniques afin d'assurer leur gestion financière, avec l'appui de la responsable du budget. La gestion administrative et des ressources humaines est restée au secrétariat de direction ce qui permet d'avoir un seul point d'entrée sur ces aspects pour l'ensemble des membres du laboratoire.

Un nouveau pôle "Communication&Formation" a été créé afin de mettre en place de nombreuses actions nécessaires pour valoriser l'image du laboratoire, ses activités scientifiques et ses réalisations techniques mais aussi pour lui apporter une visibilité plus importante. La formation est essentielle et importante, elle permet de continuer à acquérir de nouvelles compétences pour les agents du laboratoire et cette gestion est assurée par ce pôle.

Le pôle technique "Campus" assure quant à lui la logistique, l'entretien du parc de 12 hectares, le suivi des véhicules administratifs, la maintenance immobilière et les travaux nécessaires au fonctionnement général de nos bâtiments représentant une superficie de 6 300 m². Le pôle "Campus" est également fortement impliqué dans l'évolution de l'infrastructure du site avec la future construction du bâtiment CREATIF, dont la livraison est prévue pour 2021, et la rénovation du bâtiment principal du site ainsi que son environnement (création d'un lieu de vie, réfectoire, construction d'une chaufferie à géothermie, etc.). Pour ces deux opérations distinctes, un premier CPER d'un montant de 4,8 millions d'euros a été obtenu sur la période 2014-2020 pour CREATIF. Un nouveau CPER sera déposé dans les mois à venir pour la période 2021-2027 pour la rénovation du bâtiment principal "le Château" et de son environnement.

Le service travaille en étroite relation avec la Délégation Régionale Aquitaine, l'Université de Bordeaux et l'IN2P3. À ce titre, il est le premier maillon de la chaîne de gestion et l'interlocuteur des tutelles. Le laboratoire est en Délégation de Gestion Financière au CNRS depuis 2011.

RESPONSABLE DE SERVICE

Jérôme BAUSSART

ADMINISTRATION-FINANCE

Nadine CAMONA

Pascale CHAMBON

Nathalie FAVRET

Isabelle GRIVEAU

Sylvie PERRÈVE

CAMPUS

Thierry BATAILLE

Eric BOULET

Maria Albertina DE BRITO BARROS

Michaël KUNZ

COMMUNICATION & FORMATION

Fanny CADOU

INTRODUCTION

Sous la responsabilité du Directeur administratif du laboratoire, le service "Administration—Campus—Communication&Formation" est composé de 7 agents CNRS et de 4 agents universitaires. Il a pour mission d'apporter aide et support aux équipes scientifiques et techniques du laboratoire. Il a un rôle important d'interface avec l'IN2P3-CNRS, la DR15 du CNRS et l'Université de Bordeaux.

Réactif et efficace, celui-ci assure un soutien primordial aussi bien aux personnels pour la gestion de leur carrière, que dans la gestion administrative et financière des projets de recherche. Il veille également au bon fonctionnement logistique et bâtiminaire du site ainsi qu'à la mise en place des actions de communication et de formation. Au sein du service, 3 pôles ont été mis en place depuis septembre 2018 avec l'arrivée de la nouvelle direction du laboratoire :

- le pôle "Administration" composé de 5 agents ;
- le pôle "Campus" composé de 4 agents ;
- le pôle "Communication&Formation" composé d'1 agent.



CREATIF

Centre de REssources
en métrologie
des rAyonnemenTs
Ionisants
et Formation

1 PÔLE ADMINISTRATION

Le pôle "Administration" joue un rôle essentiel dans la gestion des liens avec nos tutelles du CNRS et l'Université de Bordeaux. Nos contacts sont fréquents et réguliers avec l'IN2P3, la Délégation Régionale Aquitaine du CNRS, ainsi qu'avec les services centraux de l'Université de Bordeaux. Les missions du pôle sont réparties en 2 activités :

- La gestion financière
- Le secrétariat, la gestion administrative et des ressources humaines

LA GESTION FINANCIÈRE

Le budget du laboratoire vient de l'IN2P3-CNRS, de l'Université de Bordeaux (qui prend en charge l'intégralité des fluides) et de ressources propres diverses venant de multiples guichets comme l'Europe, l'ANR, les collectivités territoriales, les PIAs, la valorisation via l'industrie et les secteurs privés, etc. En moyenne sur ces dernières années, ce budget s'élève à environ 1,5 millions d'euros par an, hors dépenses de personnel.

Les ressources financières du laboratoire sont gérées par quatre personnes dont une responsable et trois gestionnaires financières. Pour cela, elles sont mobilisées en permanence pour l'élaboration, le suivi et l'exécution du budget en recettes et en dépenses. Le laboratoire est en Délégation de Gestion Financière au CNRS depuis 2011, le service utilise donc principalement l'outil de gestion GESLAB du CNRS. Du côté de l'Université, le logiciel GFC est utilisé pour quelques commandes (notamment sur les crédits IDEX qui restent en gestion aux services comptables de l'Université de Bordeaux) mais aussi pour les missions sans frais des personnels universitaires.

Le volume d'actes financiers annuel est important. À titre d'exemple, et pour l'année 2018, le pôle a géré 3400 commandes/factures. Parmi ces achats, il y a bien entendu des achats de

fonctionnement mais aussi des achats d'équipements onéreux qui nécessitent la mise en place de marché puis une gestion des immobilisations et de l'inventaire. La carte achat est un moyen de paiement omniprésent dans le service, les agents n'hésitent pas à s'en servir très régulièrement et dès que possible. La réalisation de ce travail impose la connaissance des règles de la comptabilité publique et celles applicables aux marchés passés par nos tutelles. Le service est donc là pour apporter conseil et assistance lors de tous les achats réalisés au laboratoire.

Les agents du laboratoire effectuent en moyenne 660 missions par an dont les destinations reflètent la dimension nationale et internationale des collaborations de recherche dans lesquelles le laboratoire est impliqué. Les agents du service participent activement à l'organisation de ces déplacements professionnels en réalisant les formalités nécessaires aux déplacements que ce soit pour les aspects financiers (achats des titres de transports, hébergement, établissement des états de frais) et logistiques.

Le service est également présent au quotidien dans le montage administratif et financier de projets, de collaborations nationales et internationales, de projets européens, de projets régionaux, de coopérations industrielles, etc... Il met au service des chercheurs ses connaissances juridiques et administratives pour l'élaboration des dossiers avec notamment l'appui des services partenariats et valorisation de nos tutelles. À la fin du contrat, la justification financière est faite par le service là aussi avec le soutien des services administratifs des tutelles. Le suivi des contrats de recherche est une prérogative du service et il est réalisé à travers l'interface Webcontrat du CNRS dont le CENBG a été pilote dans sa mise en place sur la Délégation Régionale Aquitaine.

Le pôle assure la tenue de tableaux de bord budgétaires et financiers nécessaires à la direction et aux tutelles ainsi que diverses opérations budgétaires. Le contrôle des comptes du laboratoire se fait à la fois en interne avec les responsables de groupes et de services mais aussi en externe en lien avec la Délégation Régionale Aquitaine en faisant un contrôle régulier de la cohérence BFC/GESLAB pour le CNRS.

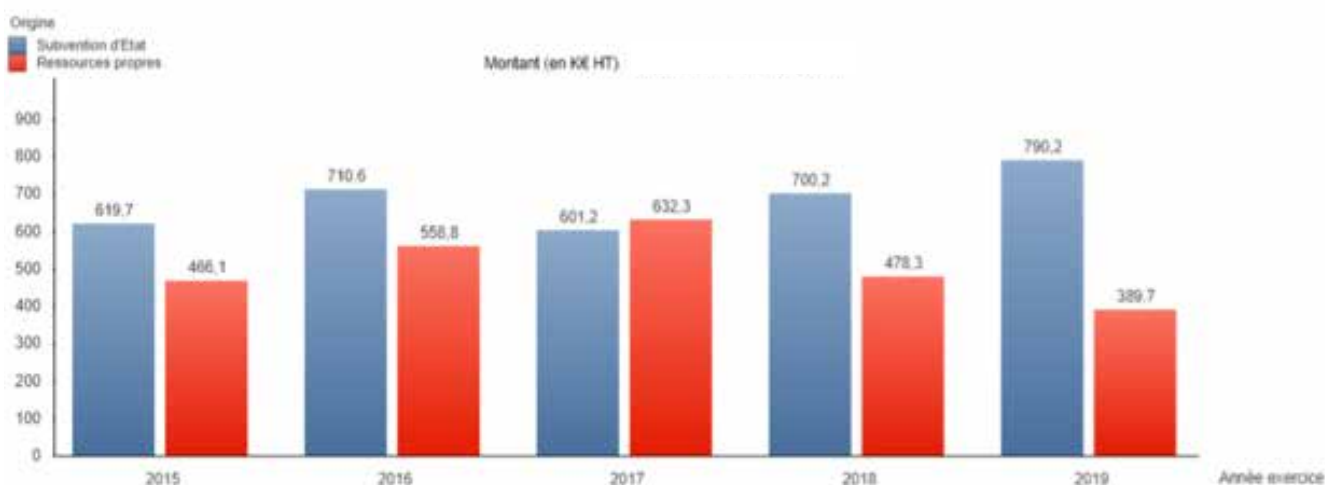


FIGURE 1 Évolution des dépenses gérées par le CNRS

L'évolution du métier

Ces dernières années ont été riches en évolution réglementaires et en nouveautés. Parmi les évolutions les plus importantes, il y a eu en 2015 la mise en place de la dématérialisation des factures avec la création du Service Central du Traitement de la Dépense (SCTD). Tous les originaux des factures partent maintenant dans ce nouveau service pour y être traitées, nous n'avons plus que des scans.

Puis, le CNRS a mis en application au 1er janvier 2016 la réglementation relative à la GBCP (Gestion Budgétaire et Comptable Publique). La comptabilité budgétaire est désormais clairement distincte de la comptabilité générale et repose sur un principe nouveau: l'enregistrement des recettes et dépenses au moment des encaissements et décaissements. Nous avons vu arriver l'utilisation des "autorisations d'engagement" (AE), ainsi que les "crédits de paiements" (CP).

Avec la GBCP, la programmation des crédits est devenu un exercice régulier à faire pour chaque contrat. Le suivi des contrats de recherche est une prérogative du service et cette programmation des crédits est maintenant réalisée à travers l'interface Webcontrat du CNRS et notamment l'onglet "SIGFIC".

Nos outils de travail GESLAB et GFC pour la gestion ont été grandement modifiés pour permettre de répondre à cette transformation budgétaire. Du côté du CNRS, GESLAB lourd et GESLAB Web sont devenus nos outils quotidiens.

Au 1er janvier 2017 l'obligation a été faite aux grandes entreprises d'émettre les factures à destination de l'État et du CNRS au format électronique. La solution technique mutualisée "Chorus Portail Pro" permettant le dépôt, la réception et la transmission des factures électroniques a été mise à disposition des fournisseurs par le CNRS. Toujours en 2017 le CNRS a déployé l'Achat en Ligne (AEL) dans GESLAB pour les marchés nationaux informatiques, ainsi que l'UGAP et GAUSS.

Au 1er Janvier 2019, nous avons vu arriver une refonte du "Service Fait" qui s'inscrit dans le cadre de la GBCP. Un processus en 3 étapes a été introduit dans GESLAB: la réception, la constatation et la certification de l'exécution du service fait qui découle en prise de décision de conformité et de paiement.

Enfin et pour terminer, le pôle financier a été audité en juin 2019 par le Service Financier et Comptable de notre Délégation sur un échantillon de nos actes financiers (achats, commandes, missions, immobilisations). Le retour a été très positif par le Service Financier et Comptable de la DR15. Nous travaillons de concert avec ce service au quotidien depuis de nombreuses années avec lequel nous entretenons d'excellentes relations.

Depuis maintenant plusieurs années, les agents du pôle financier ont vu leur métier évoluer de façon très significative. Ces changements énoncés ci-dessus ont nécessité des formations fréquentes et de réelles capacités d'adaptation de la part des agents du pôle. La compétence du pôle financier du CENBG est reconnue et c'est aussi une des raisons pour laquelle, nous avons été à nouveau sollicités par notre tutelle CNRS pour être pilote dans la mise en place de "Etamine" (dématérialisation du processus des missions).

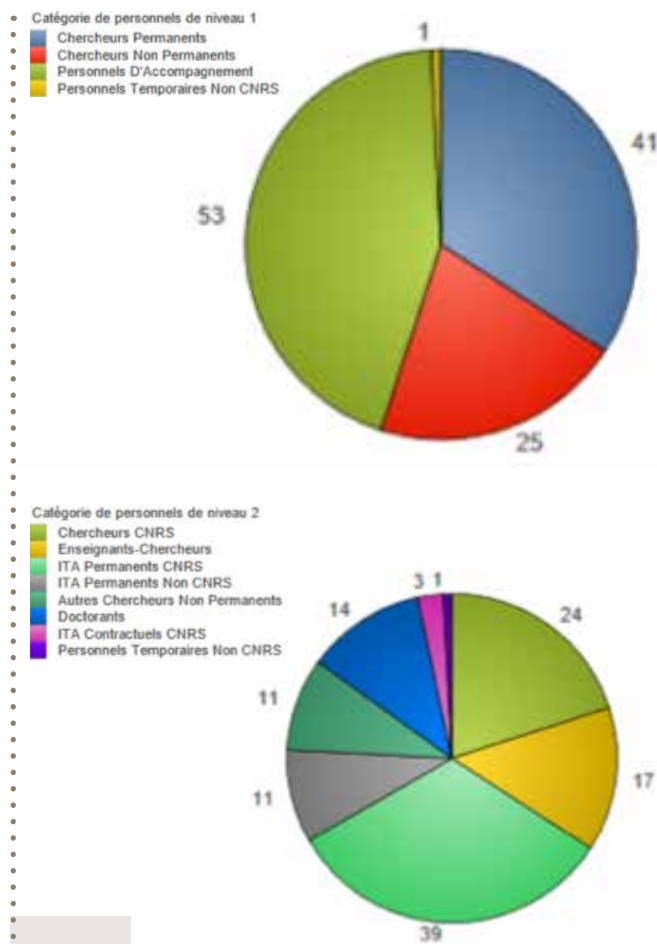


FIGURE 2 Répartition des personnels par catégorie

Catégorie de personnels de niveau 2

— Doctorants

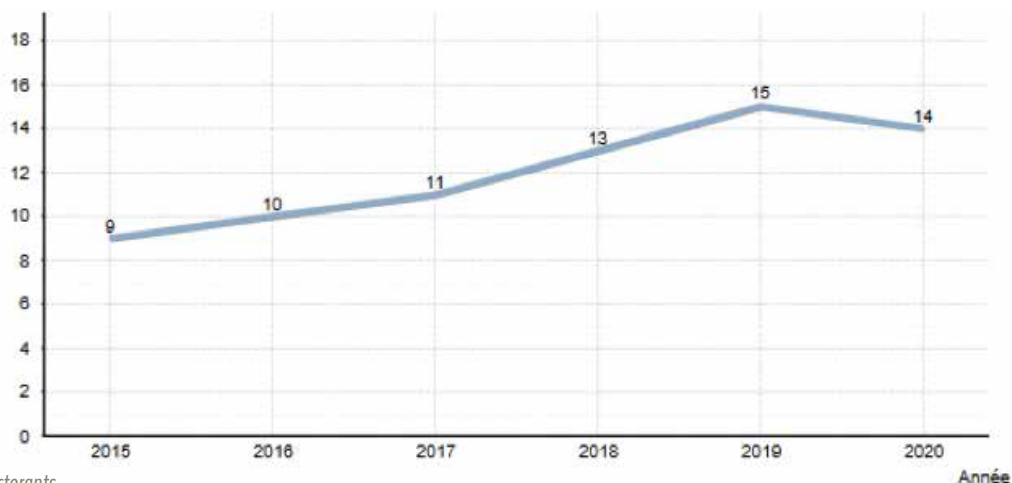


FIGURE 3 Évolution du nombre de doctorants

LE SECRÉTARIAT, LA GESTION ADMINISTRATIVE ET DES RESSOURCES HUMAINES

La direction du laboratoire est soutenue au quotidien par ce pôle et notamment par une assistante de direction qui se consacre aussi à la gestion du personnel, à l'accueil physique et téléphonique. Elle prépare des documents de travail, suit et classe les courriers, tient un agenda partagé avec le directeur de l'unité et le directeur administratif, organise et prépare les rendez-vous et les réunions. Elle assure par ailleurs la logistique concernant les livraisons, la gestion des petites fournitures ainsi que le tri et la distribution du courrier pour l'ensemble du laboratoire.

Ce pôle est composée d'une assistante de direction qui travaille de concert avec le directeur administratif du laboratoire. Une de ses prérogatives importantes est la gestion de nombreux dossiers administratifs avec notamment la mise à jour des personnels dans la base nationale CNRS RESEDA. Cette base doit impérativement être à jour afin de permettre aux agents de l'unité d'accéder à toutes les applications du CNRS comme AGATE, SYMBAD, etc... D'autres dossiers arrivent régulièrement comme la gestion annuelle de l'EAOM avec nos tutelles, moment important d'échanges et de discussions. Le pôle s'occupe de toute sa préparation et de son organisation en lien avec la responsable financière du laboratoire. Nous sommes également sollicités régulièrement pour répondre à des enquêtes de nos tutelles comme récemment avec la mise en place du télétravail.

Ce pôle doit également faire le nécessaire face à l'accueil des visiteurs avec des procédures parfois lourdes et complexes. L'accueil de visiteurs étrangers impose des formalités particulières et une aide plus importante pour les personnes ne parlant pas français. Il s'agit alors de mettre en place une convention d'accueil, de faciliter l'installation et d'obtenir un visa. Pour cela, nous avons deux interlocuteurs principaux qui sont le Fonctionnaire Sécurité Défense et le Bureau d'Accueil des Chercheurs Internationaux de l'Université.

Le CENBG accueille de nombreux stagiaires (environ 40 par an) issus de formations très diverses allant de la 3ème pour un stage de découverte à des stages de master 2 ou stages d'ingénieur. Le pôle gère les dossiers depuis la mise en place de la convention, jusqu'au paiement de la gratification.

Le pôle réalise également le suivi administratif des 120 agents du laboratoire, chercheurs, enseignants-chercheurs et IT et des personnels non permanents, contractuels IT CDD chercheurs, doctorants en lien avec le service des ressources humaines de la délégation régionale Aquitaine, de l'IN2P3 ou de l'Université de Bordeaux.

Pour le personnel permanent, le pôle suit tous les aspects liés au temps de travail (gestion des congés, temps partiel, CET, NOEMI...) ainsi que la gestion administrative de la carrière des agents en poste que ce soit pour les cumuls d'activités, les promotions ou le suivi des rapports d'activités annuels.

Pour le personnel contractuel, le pôle assure toutes les démarches nécessaires au recrutement des agents non-permanents. L'année 2019 a été une année record en termes de recrutement : 12 CDD chercheurs, 2 CDD IT et 8 doctorants. Depuis 2018 et suite aux recommandations de l'Europe, le CNRS a mis en place HRS4R ("Human Resources Strategy for Researchers") dans le but d'améliorer le processus de recrutement des personnels contractuels. Tout le processus suivant est à la charge du pôle: les offres d'emploi pour les contractuels, chercheurs, ingénieurs et techniciens de plus de 3 mois, ainsi que les offres de contrat doctoral doivent être publiées sur le "Portail Emploi" du CNRS. L'objectif est d'assurer la transparence et la traçabilité des recrutements. La sélection du lauréat est faite par le responsable scientifique du recrutement et le pôle effectue ensuite la demande de recrutement via Webcontrat et le module "CANOPE".

Le laboratoire se trouve sur un site excentré de l'université de Bordeaux d'une superficie de 12 hectares avec environ 6 300 m² de bâtiment. Il y a eu un certain turn-over dans le service avec le départ du responsable du pôle, agent CNRS, fin 2015. Son remplaçant, un agent universitaire, n'est arrivé que 2 ans plus tard. Le pôle a été renforcé en 2017 avec l'arrivée en CDD d'un Technicien pour l'entretien et la rénovation des bâtiments. C'est avec un grand plaisir et soulagement que ce poste a été pérennisé en 2019 grâce à un concours externe CNRS.



2 PÔLE CAMPUS

Les quatre personnes du pôle "Campus" ont donc la responsabilité de toutes les tâches relatives au fonctionnement du site, à son exploitation, et à la maintenance des bâtiments. La gestion d'un parc de 12 hectares n'est pas une mince affaire. L'entretien est colossal avec les tontes, les tailles des haies, la gestion des bois et arbres morts, les parterres fleuris à entretenir et renouveler, etc... Le ménage et le nettoyage du site fait aussi partie des prérogatives du pôle. Une personne a suivi toutes les formations nécessaires pour ne s'occuper que du ménage des salles de manip et des plateformes. Elle a également bénéficié d'un tutorat pour devenir Technicienne de paillasse avec l'aide et le soutien du responsable du groupe IRIBIO. Après plusieurs formations en chimie et biologie, le tutorat a été validé par les services des ressources humaines de l'université et l'agent travaille maintenant à 50% dans le pôle "Campus" et à 50% dans le groupe IRIBIO. Ce tutorat a été un succès et permet de valoriser l'agent et le laboratoire. Le reste du ménage du site a été confié à une société privée que notre tutelle hébergeante

prend en charge depuis le début de 2019. De plus, le pôle apporte un véritable soutien logistique lors de manifestations au laboratoire comme les 50 ans du laboratoire, les journées portes ouvertes, tous les séminaires du vendredi, etc... Un autre rôle important du pôle est de superviser tous les travaux de modification, de rénovation ou de maintenance des bâtiments. Nous travaillons en étroite relation avec les services techniques de l'Université qui assument les travaux les plus importants. A titre d'exemple, voici une liste non exhaustive des principaux travaux réalisés par l'Université sur notre site ces dernières années:

- Remplacement et traitement des anciens paratonnerres radioactifs: 28 Keuros
- Elagage et mise en sécurité du site: 10 Keuros
- Réparation clôtures: 7 keuros
- Traitement fuite sur toiture ARCANE: 8 Keuros
- Mise aux normes de la centrale incendie: 40 Keuros
- Changement transfo électrique au château et changement TGBT du château et d'AIFIRA: 52 Keuros
- Remise aux normes BAES: 6 Keuros
- Enlèvement de 4 tonnes de paraffine: 4 Keuros
- ...



Les travaux nécessitant des moyens moins importants sont réalisés en interne par notre technicien. Depuis son arrivée en 2017, de nombreux travaux ont pu être réalisés pour le bon fonctionnement du laboratoire et le bonheur des agents. Notamment la réalisation d'une douche pour les sportifs du site, la rénovation de plus de 10 bureaux, l'aménagement des sanitaires du 2ème étage du Château pour un accès PRM, la rénovation des sols des 3 algécos sans oublier tout le quotidien concernant la petite plomberie, des travaux d'électricité, des déplacements de cloisons... Le travail à faire est là aussi colossal tant la vétusté des bâtiments est importante. De plus, l'entretien et le suivi du parc des 3 véhicules administratifs est une tâche réalisée avec beaucoup de rigueur, sécurité oblige. Une particularité marquante à signaler est aussi le souhait de cet agent de transmettre son savoir-faire à de jeunes stagiaires. C'est pour cela que le laboratoire a accueilli lors de 4 stages de 15 jours un jeune en CAP Peintre Applicateur de revêtement. Ce stage a permis à cet étudiant de valider son CAP grâce notamment au savoir-faire qui lui a été transmis lors de ses venues au laboratoire. C'est une fierté pour le pôle qui souhaite bien évidemment renouveler cette expérience et nous avons déjà quelques pistes. Afin de réaliser des travaux bien spécifiques des entreprises extérieures viennent sur notre site. Le pôle assure alors le suivi de ces entreprises ainsi que le contrôle et la validation des travaux.

Comme mentionné précédemment, le pôle "Campus" via son responsable, a déjà joué un rôle déterminant pour le projet de construction du futur bâtiment CREATIF (Centre de REssources en métrologie des rAyonnements Ionisants et Formation). Ce projet CPER 2014-2020 d'un montant de 4,8 millions d'euros concerne donc la construction d'un bâtiment technique et de formation d'une surface d'environ 2 000 m². Un groupe de travail a été mis en place composé du Directeur du Laboratoire, du Directeur Administratif, du responsable du pôle "Campus" et du responsable du service Instrumentation. Ce groupe de travail a été fortement sollicité pour participer à de multiples réunions: réunions d'analyse des candidatures et des offres techniques remises par les architectes et bureaux d'études, rencontres avec les lauréats du projet, participations aux réunions techniques concernant l'APS, l'APD, le DCE, etc... La participation du responsable du service Instrumentation a été très appréciée, sa vision technique, scientifique et stratégique a eu un impact déterminant pour la bonne réalisation de ce projet. Nous ne pouvons que le remercier à nouveau pour son aide et son implication sans faille. Le pôle a participé à toutes les nombreuses réunions mises en place autour de CREATIF. La construction du bâtiment devrait commencer au printemps 2020 pour une livraison fin 2021.

En parallèle à la construction de ce bâtiment, le pôle est également impliqué par la construction de la future chaudière à Géothermie qui alimentera tous les bâtiments du site. A ce jour, nous avons toujours une chaudière fonctionnant au fuel et dont les pannes ont été assez régulières ces dernières années. Là aussi, de nombreuses réunions ont été faites concernant l'étude de faisabilité, la réalisation technique, la gestion du forage sur site...

Et enfin, le pôle commence juste à participer à la mise en place d'un nouveau CPER qui sera déposé dans les mois à venir pour la période 2021-2027. Ce projet concernera la rénovation du bâtiment principal "le Château" et de son environnement: traitement isolation, remplacement de plus de 95 menuiseries, traitement de l'amiante, mise aux normes électriques, création d'un lieu de vie, création d'un réfectoire, création d'un espace de communication... La maîtrise d'ouvrage sera assurée par les services techniques de l'Université de Bordeaux mais une convention a été signée avec le service technique de la DR15 du CNRS pour la mise en place d'un partenariat dans la définition et la réalisation de ce projet. Projet ambitieux là-aussi qui sera un nouveau défi pour le pôle durant ces prochaines années.



3

PÔLE COMMUNICATION & FORMATION

Depuis l'arrivée de la nouvelle direction, ce pôle a été rattaché au service "Administration-Campus-Communication&Formation". Les actions de communication mises en place ces dernières années seront développées dans un chapitre de ce rapport d'activité. Leurs nombres sont importants au laboratoire et il était donc primordial de créer ce pôle afin de lui donner une vraie visibilité et une véritable reconnaissance. Pour cela, une gestionnaire financière a fait une reconversion professionnelle (réalisée avec succès) pour se concentrer sur la communication du laboratoire, l'organisation d'événements, la réalisation de plaquettes, de posters, du site web... une formation lourde de plusieurs mois a été nécessaire pour cette reconversion. Cette formation lui a permis d'acquérir la maîtrise de plusieurs logiciels de graphismes et de designer web grâce au soutien de la DR15 et de son service de formation permanente. Cerise sur le gâteau, cette formation était aussi diplômante, ce qui lui a permis d'avoir un diplôme de niveau III.

Le pôle a participé à de nombreuses actions de communication ces dernières années comme les 50 ans du laboratoire, les 80 ans du CNRS pour lesquels le laboratoire a obtenu un financement, les journées portes ouvertes etc...

Au sein du service, et donc dans ce pôle, l'agent assure la fonction de correspondant "formation" pour le laboratoire. Les formations proposées par nos établissements de tutelle sont transmises aux personnels du laboratoire afin de les informer. Certaines formations sont récurrentes, d'autres sont plus ponctuelles et permettent aux personnels de développer de nouvelles compétences ou de se mettre à jour au niveau scientifique et technique. C'est bien évidemment ce pôle qui se charge de la rédaction du plan de formation de l'unité en fonction des besoins et des priorités de l'unité. Tous les ans, un budget est attribué à la formation des agents du laboratoire par la direction. Tous les ans, ce budget est largement utilisé... Ce qui démontre donc que l'implication des agents dans les formations est un sujet essentiel.



ELECTRONIQUE ET ACQUISITION

Le service était composé de 5 équipiers jusqu'en septembre 2019. Raphaël BOUET nous a rejoint en Septembre 2019 pour épauler nos développements de systèmes embarqués pendant 2 ans. Le SEA sera donc constitué de 6 membres fin 2019.

ABSTRACT

The CENBG Laboratory owns an Electronic & Acquisition Service, able to define a complete acquisition system according to the requirement of a Physic experiment. From CENBG creation, its service bring full support needed to create experiments, allowing discovering of new phenomena like the two protons radioactivity.

From its 52 year old of existing and new technologies, the SEA acquired a know-how in reading analog signals from radioactivity detectors, their digitization and their processing. Its expertise extends to analog digital board conception; to PCB technologies ; to develop embedded system based on FPGA and associated software to control and to acquire measurements. Projects coming more and more complexes and international, SEA team has an expertise in programs management, in continuous improvement to bring innovation in the core of our realization.

RÉSUMÉ

Le CENBG possède un service Electronique & Acquisition capable de définir un système complet d'acquisition pour une expérience de physique. Dès la création du CENBG, ce service a apporté le soutien nécessaire à la création des expériences, permettant la découverte de nouveaux phénomènes comme la radioactivité deux protons.

Avec ses 52 années d'existences et l'évolution des technologies, le service électronique & acquisition possède un savoir-faire dans la lecture analogique des signaux issus des détecteurs de rayonnements, de leur numérisation et leur traitement. Son expertise s'étend à la conception de cartes analogiques numériques, aux technologies de fabrication PCB, aux systèmes embarqués à base de FPGA et aux développements logiciels pour le contrôle & commande, ainsi que l'acquisition des mesures. Les projets devenant de plus en plus internationaux et de plus en plus complexes, le SEA est devenu un expert en gestion de programme, en amélioration continue pour apporter toujours plus d'innovation pour la réalisation d'expériences de physique.

RESPONSABLE DE SERVICE

Frédéric DRUILLIOLE

PERMANENTS

Patrick HELLMUTH

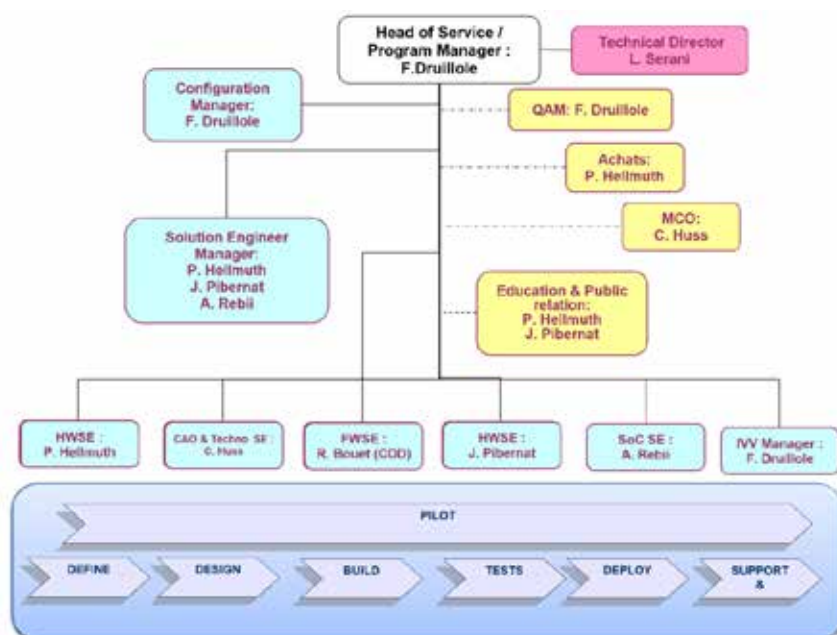
Cédric HUSS

Jérôme PIBERNAT

Abdel REBII

CDD

Raphaël BOUET



COLLABORATIONS

Au-delà des collaborations sur projets, nous avons des liens privilégiés avec le GANIL et le CEA/IRFU/ DEDIP. Cela permet de partager nos briques de base avant leurs déploiements dans des instruments innovants.

SBNA, Financement sur projet et Valorisation permettent au SEA d'être convenablement équipé pour la réalisation de prototypes, et de lancer quelques actions de R&T et R&D.

INTRODUCTION

L'objectif principal du service est de susciter l'envie, l'envie de créer, de s'améliorer, de travailler, d'entreprendre avec nous. Les activités et le travail fourni doit permettre d'être reconnus au sein du laboratoire et des collaborations. Pour cela, toutes tâches entreprises au sein du laboratoire doivent s'obstiner à l'excellence. Ainsi, le service "SEA" regroupe un ensemble de métiers nécessaires à l'élaboration d'un sous-ensemble de mesures

d'un instrument scientifique. Dans notre cas, c'est la chaîne d'acquisition, du détecteur à la mesure. La confrontation des expériences de chaque membre du service permet d'uniformiser les pratiques, d'améliorer le savoir-faire et donc de minimiser les risques lors des développements. Les chercheurs identifient ainsi un guichet unique pour traduire leur besoin de technologie de mesures en réalité.

Finalement, le SEA possède quatre axes d'activités :

MCO - Des actions récurrentes permettant le bon fonctionnement du service :

Maintenance en condition opérationnel (MCO) des produits conçus

- La gestion des stocks et l'inventaire
- La formation et l'éducation
- La communication

- La gestion des achats et des investissements

- La gestion de configuration des éléments produits
- Le management

Conceptualisation - Les actions amonts qui vont permettre d'intégrer des projets rapidement en validant des produits :

- Recherche & technologie (détecteurs, PCB & Composants)
- Recherche & développement (Briques de bases, fonctions électroniques et logiciel d'acquisition)

Projets - Les actions aval, concernant le développement de sous-ensembles pour des projets. Cela est constitué :

- Des projets extra-laboratoire (collaborations nationales et internationales)
- Des projets internes.
- Des processus d'amélioration continue de nos compétences.
- Minimisation des risques techniques.

Prospective

Elle concerne l'équilibre entre les besoins en MCO, des développements en cours et l'arrivée de nouveaux projets permettant de faire évoluer nos activités, nos compétences et le plan de charge du service, de préparer l'avenir du service.

CHACUN DES MEMBRES A DES COMPÉTENCES PROPRES QUI PERMETTENT D'ABORDER TOUS LES ASPECTS DE LA CHAÎNE D'ACQUISITION POUR DÉTECTEURS DE RAYONNEMENT.

LES POINTS FORTS DU SERVICE SONT:

- La conception de cartes électroniques mixtes.
- Etude et conception des amplificateurs frontale de lecture des détecteurs.
- L'expertise en technologie PCB. C. Huss, CAO designer est Certified Interconnect Designer, certification internationale reconnue par l'ensemble des compagnies EMS.
- Développement de systèmes embarqués à base de FPGA avec une expertise sur Xilinx (ARTY, Zynq & Kintex).
- Développement de banc de test et des scénarios de test de vérification et validation des produits.

SPÉCIALISTE DE LA GESTION DE PROJET ET DE MANAGEMENT D'ÉQUIPES.

GHISMO

GHISMO (Generic Hardware, Firmware and Software Module for Physics) est une phase de R&D en association avec le CEA/IRFUDEDIP pour que les développements des sous-produits au niveau hardware, firmware et logiciel se fassent de façon modulaire. L'objectif est de permettre une versatilité dans la configuration des instruments. Dans ce cadre, nous avons développé une carte SAM avec l'ASIC AGET (en phase de déploiement), une carte TED avec l'ASIC ATHED (en phase de développement), un firmware avec des IPs réutilisables. Il faut voir GHISMO comme une façon de développer nos produits, en imaginant une utilisation pour plusieurs expériences et non pas limitée au premier besoin. Par ce filtre, nos développements sont valorisables auprès d'autres laboratoires pour un coût financier et humain réduit. Notre cible est de maximiser la réutilisabilité des produits en concevant des architectures orientées composants.

SAGE-Narval

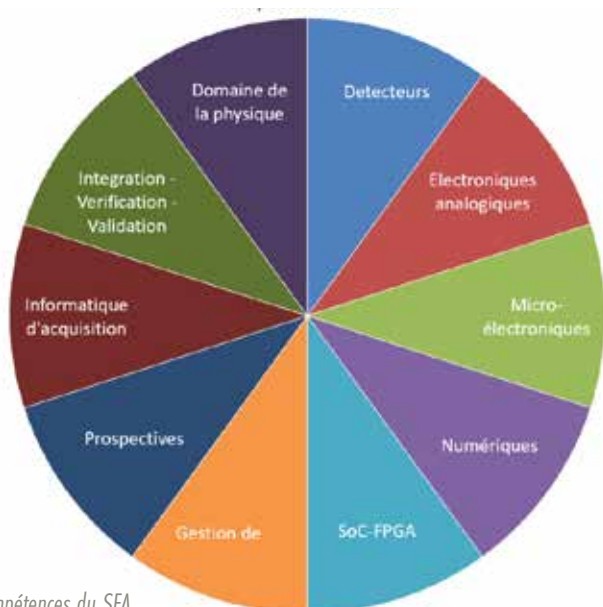
Au sein du laboratoire, différents groupes de recherche ont des besoins similaires en termes de systèmes d'acquisition de données pour leurs expériences. Une solution convergente a donc été mise en place depuis 2006. Elle permet de partager une expérience et de mutualiser un savoir-faire autour d'un outil commun. La solution retenue est l'adoption du Système d'Acquisition Ganil Externe (SAGE).

Le Service Electronique & Acquisition du laboratoire a pris en charge l'installation, le suivi et la maintenance de ces systèmes, ainsi que les futurs développements liés aux besoins spécifiques d'équipes du laboratoire.

Les développements réalisés au sein du service sont basés sur l'intégration d'un module VME à base de FPGA dans le système d'acquisition SAGE.

Plusieurs travaux ont été effectués à la fois coté programmation des FPGA et coté logiciels: Réalisation du driver VME du module, ainsi que son intégration dans le système contrôle Commande Narval.

Il en résulte plusieurs applications pour différents groupes de recherches: ENL, NEX et ACEN.

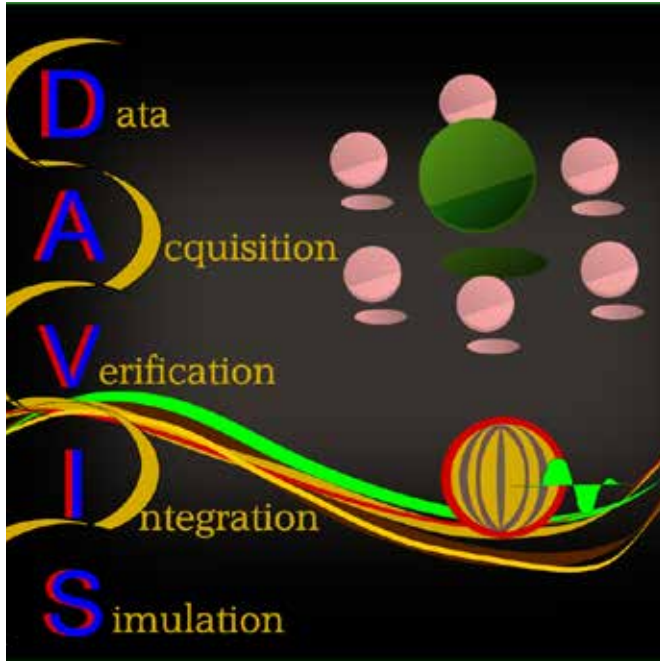


Système de test des électroniques frontales

Lors du développement des préamplificateurs de charge ou de courant pour la lecture des détecteurs, nous sommes confrontés à la sélection des composants électroniques pour leur niveau bas bruit et à la validation du produit. Le test par générateur permet de valider fonctionnellement le préamplificateur, mais la vraie validation doit se faire avec un signal physique issu d'un détecteur de rayonnement. Nous sommes en train de développer un banc de test générique permettant de réaliser les mesures de bruit et le test par un signal physique du préamplificateur. Nous utilisons pour cela un détecteur SiPM et une source de lumière de 470nm. Nous utilisons actuellement ce système pour valider les amplificateurs de WiSarD. Le système est en cours d'intégration dans une baie pour le rendre mobile. Le banc est constitué d'une source de lumière réglable, d'un rack d'alimentation basse et moyenne tension, d'un système d'acquisition basé sur un ADC 500MHz 14bit, d'un module Data Logger Keysight et d'un PC.

Qinjector

Qinjector est un injecteur de charge versatile allant jusqu'à 128 sorties. Basé sur un serveur applicatif, il est contrôlé à travers des commandes Unicode envoyées à travers le réseau en TCP/IP. Il génère des signaux d'impulsion à amplitude variable de 0 à 1V de largeur minimal de 40ns à une fréquence de quelques dizaines de kilohertz. Il intègre une voie capacitive permettant de créer une charge en Coulomb ainsi qu'une voie de filtrage pour modifier la forme de l'impulsion. Cela permet de vérifier le bon fonctionnement de nos cartes multicanaux comme pour la carte SAM (64 voies), TED (32 voies) et sert pour le banc de test de la carte ABC de Juno (128 voies). Qinjector a été déployé pour le test de production des 3000 ASICs CATIROC à OMEGA.



DAVIS

DAVIS (Data Acquisition for Verification Integration and Simulation) est un Framework logiciel unique pour piloter des systèmes hétérogènes de façon fiable et rapide. Il permet la scénarisation des tests lors de développements de cartes électroniques, de l'intégration de sous-systèmes et de systèmes complets lors des étapes de Vérification, Validation, Qualification du produit. Il est le Framework idéal pour la vérification des étapes de production et également de la maintenance opérationnelle des produits.

Il réduit les coûts de développement des test en accélérant le temps de développement et en minimisant les acteurs impliqués. DAVIS possède une architecture adaptable et évolutive en intégrant un serveur de Drivers matériel, un serveur d'instruments LXI (SCPI) et une interface utilisateur basé sur des scénarios de test en python et une interface évolutive en HTML, CSS et JavaScript. DAVIS est déployé sur l'ensemble des bancs de test développés par le service. Nous faisons régulièrement des évolutions pour augmenter ses fonctionnalités, notamment pour l'exploitation des mesures. Il est utilisé pour Juno et RenoCats.

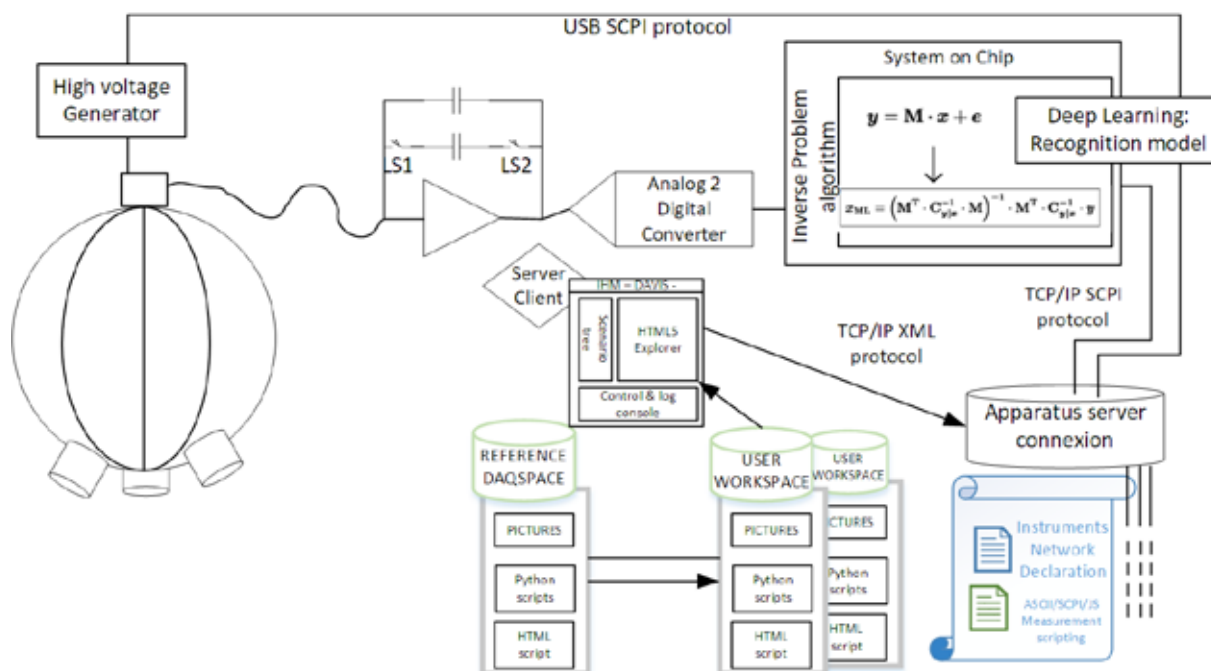
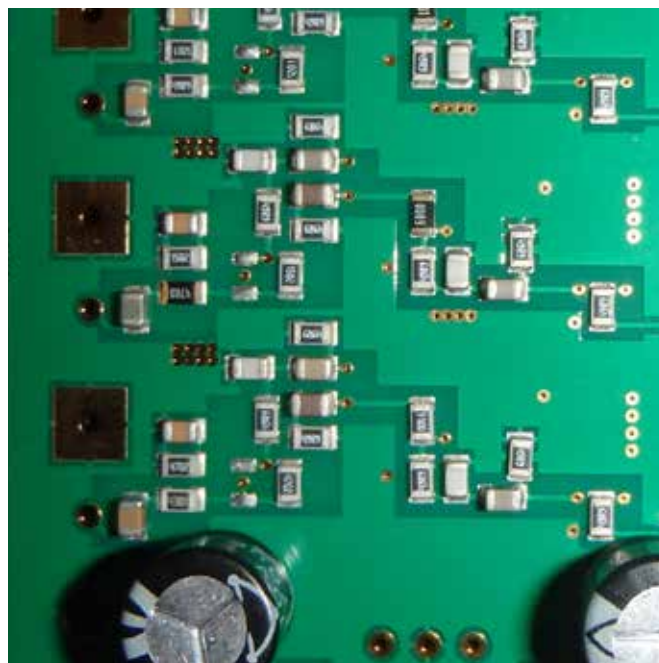


SUNRISE-PhotoCell

Le groupe Aval du Cycle Electronucléaire utilise depuis fort longtemps dans ses expériences, des cellules photovoltaïques comme détecteurs de fragments de fission. Les préamplificateurs conçus pour effectuer la lecture de ces détecteurs deviennent obsolètes et sont difficilement maintenables en condition opérationnelle. L'objectif de ce travail de R&D est double: Il s'agit d'une part de concevoir des préamplificateurs qui présentent des caractéristiques similaires ou meilleures aux préamplificateurs existants dans les mêmes conditions d'utilisation, et d'autre part, d'adopter une topologie de circuit qui permette d'adapter facilement le gain du préampli en fonction notamment de la quantité d'énergie recueillie par les cellules photovoltaïques et/ou en fonction de la taille de ces dernières. A plus long terme, il s'agirait d'équiper une large surface de détection (de l'ordre de 30cm²) avec ces préamplis, dans le cadre du projet d'instrument NECTAR qui est lui-même en phase de R&D.

R2D2-OWEN

Le projet OWEN signifie Optimal Waveform recognition Electronic Node. Il consiste à développer un nouvel instrument pour traiter le signal venant d'un détecteur innovant, une TPC sphérique à haute pression. Son but est la recherche d'un phénomène rare tel que la détection directe de matière noire et l'observation de la décroissance double bêta sans neutrino. Le SEA a la responsabilité de fournir un amplificateur de charge haute résolution pour lire le signal, un système d'acquisition intégrant un algorithme de problème inverse basé sur les réseaux de neurones pour l'identification des formes d'ondes et du logiciel adapté de DAVIS pour le contrôle & commande et le filtrage des données. Le système stockera les données dans une base de données pour exploitation de façon automatique. Cette R&D, financé par l'idEX Emergence de l'Université de Bordeaux, est en phase de démarrage pour une prise de données mi-2021.



ACTAR-TPC

Les projets TPC2 au CENBG et ACTAR au GANIL ont fusionné au sein du projet ACTAR-TPC. Dans le cadre de ce projet, le SEA a fourni la solution technique pour la réalisation au CERN, de plans de 16 384 pads au pas de 2mm pour les détecteurs micro-mégas qui équipent chacune des deux chambres développées (chambre parallélépipédique du CENBG et chambre cubique du GANIL). Cette solution s'appuie sur une technologie de fabrication de PCB "hybride" consistant à empiler des couches de kapton/cuivre utilisées dans la fabrication standard de PCB, sur une âme inox de plusieurs millimètres d'épaisseur, pré-usinée selon des procédés de mécanique de précision. Le détecteur monolithique ainsi obtenu se présente comme un détecteur micro-mégas de grande dimension à forte densité de pads, mais qui a la particularité de tenir les fortes contraintes de pression s'exerçant sur les parois des chambres.

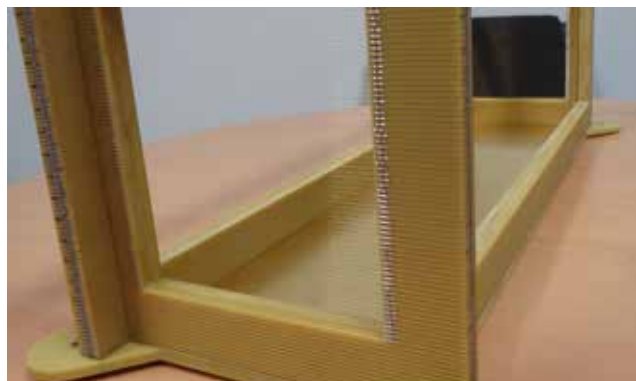
Outre les plans de pads, le SEA a aussi pris en charge la conception des cadres époxy pour la structure de la cage de dérive de la chambre parallélépipédique, selon une idée originale du GANIL, par ailleurs responsable du tissage et du soudage des fils.

Enfin le SEA a pris en charge la conception, le développement et les tests des circuits d'extraction des signaux pour les deux chambres.

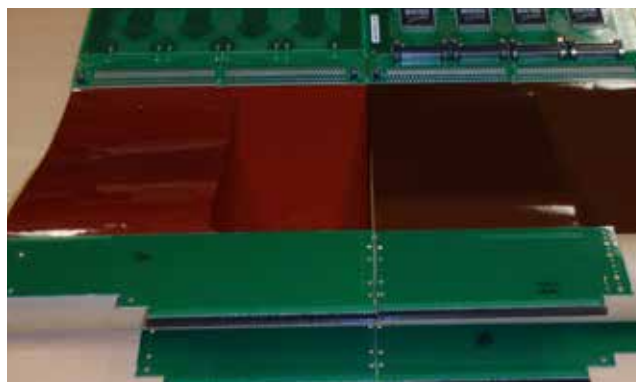
Ces circuits flexibles à impédances contrôlées pour maîtriser le bruit sur la transmission, permettent la connexion de 256 voies, d'ajuster par zones le gain du micro-mégas au moyen d'un générateur haute-tension externe, et intègrent les circuits de protection de 256 entrées de l'électronique frontale de GET (c.f. rapport d'activités 2009-2012). Le commissioning de la chambre cubique a eu lieu en novembre 2017 au GANIL et cet instrument est désormais en phase d'exploitation. La chambre parallélépipédique est quant à elle en cours d'assemblage en 2019.



16384 contacts sous le micro-mégas



Cage de dérive



ZAP-Flex 256voies



Commissioning
chambre
cubique

JUNO

JUNO (The Jiangmen Underground Neutrino Observatory) est une infrastructure de recherche dédiée à l'étude des neutrinos (hiérarchie de masse, paramètres d'oscillation ...). Elle est en construction en Chine. Le SEA a la responsabilité de développer la carte de lecture du détecteur à base de PMT 3", appelée ABC (Asic Battery Card) de 35 cm x 17 cm. Nous devons également valider l'ensemble de la chaîne d'acquisition en intégrant les cartes des autres collaborateurs et gérer la production des 200 cartes de l'expérience. Nous avons également développé un ensemble de scénarios de test pour la production des PMT, des ASIC CATIROC et de la carte ABC. L'objectif est une livraison en Chine des cartes pour fin 2020. Nous développons également le firmware pour valider la qualité des données issus des PMT 3" à travers les ASICs CATIROC. La carte finale contient 8 ASICs pour acquérir 128 signaux de PMT, un FPGA Kintex haute densité de broches. L'interface est soit USB, soit Ethernet ou soit une interface sur mesure pour dialoguer avec une carte de transfert de données vers la salle de commande. Actuellement, deux prototypes existent. La première version a prouvé la bonne résolution sur la charge et le temps malgré les 8 ASICs et le FPGA. Le second prototype est une version définitive incorporant toutes les fonctionnalités utiles pour l'expériences: voies de test intégrées, monitoring des courants et tensions, configuration et transfert des données à travers l'USB, l'Ethernet et l'interface spécifique pour la carte GCU.



RENOCATS

Le projet Renocats est une collaboration entre le GANIL et le SEA. Il consiste à renouveler l'électronique frontale et l'acquisition des données issus des détecteurs CATS. Ce sont ces détecteurs qui tracent le faisceau (SPIRAL, SPIRAL1) avant la cible. CATS est un détecteur proportionnel multi fils de 2x28 voies. Le SEA a développé un système de pré amplification directement connecté au détecteur. Ce système est composé de cartes préampli 7 voies et une carte mère support des préamplis regroupant les 2x28 voies. L'acquisition des données issu de la carte mère se fait par le biais de la carte générique SAM (Single AGET Module). La carte SAM est une carte développée par le SEA qui met en forme et numérise le signal pré amplifié. Cette carte supporte un asic AGET développé par le CEA/Irfu. Les cartes préampli ont été fabriquées début 2019, la carte mère sera finalisée fin 2019. Le tout pour une mise en service au premier semestre 2020.



DPR

Le projet DPR est comme son nom l'indique un système permettant de Détecter les Protons de Recul. Le SEA a eu la responsabilité du développement du détecteur et de l'électronique de lecture associé. Le détecteur de type micromégas est composé de 64 pads de détections. Le dimensionnement des pads a été ajusté afin d'obtenir une détection optimale. Une cage à dérive a aussi été implémentée afin d'uniformiser les champs magnétiques. Le codage, traitement et stockage des données est assuré directement par la carte générique SAM (Single AGET Module) du SEA. Cette carte supporte un asic AGET développé par le CEA/Irfu. L'acquisition est assurée par GetControlleur et par SAGE-Narval. Un système de motorisation piloté par Raspberry a aussi été développé. Ce système permet de changer de cible à distance lors des expérimentations sous faisceau. Une expérimentation a été réalisée avec l'accélérateur AIFIRA en 2017, une autre est programmée en 2019.



INFORMATIQUE

Le service informatique est un service transverse indispensable à toutes les activités du laboratoire. Il fait partie de la structure des services informatiques de l'IN2P3 et est coordonné à la DSI de l'université.

ABSTRACT

Located on an off-site campus of the University, the heterogeneous environment of the CENBG generates various IT needs and constraints. The IT department collects and analyzes user needs and associated security constraints.

As the smallest department in the laboratory, the IT department succeeds in setting up a reliable and efficient infrastructure through its skills, dynamism and motivation. It creates a coherent structure, based on a high-performance and secure infrastructure, adapted and optimized workstations.

The good knowledge of its environment, its involvement and its reactivity allow the IT department to propose the most appropriate solutions to support the laboratory's activities, in particular for the calculation and management of data, which have been rapidly developing in recent years at the laboratory level.

The IT department is a driving force in thinking about current and future issues such as new calculation approaches, data management policy or access security.

RÉSUMÉ

Situé sur un campus excentré de l'Université, l'environnement hétérogène du CENBG génère des besoins et des contraintes informatiques variés. Le

service informatique recueille et analyse les besoins des utilisateurs ainsi que les contraintes de sécurité associées.

Plus petit service du laboratoire, le service informatique réussit par ses compétences, son dynamisme et sa motivation à mettre en place une infrastructure fiable et performante. Il crée une structure cohérente, basée sur une infrastructure performante et sécurisée, des postes de travail adaptés et optimisés.

La bonne connaissance de son environnement, son implication et sa réactivité permettent au service informatique de proposer les solutions les mieux adaptées en soutien des activités du laboratoire, en particulier pour le calcul et la gestion des données, qui sont depuis quelques années des points en fort développement au niveau du laboratoire.

Le service est moteur dans les réflexions sur les problématiques en cours et à venir comme les nouvelles approches de calcul, la politique de gestion des données ou la sécurisation des accès.

RESPONSABLE DE SERVICE

Isabelle MOREAU

PERMANENTS

Serge BORDÈRES

Abdelaziz HABBOUSE

Catherine SEZNEC

INFORMATIQUE



SI

Service informatique

DSI

Direction des systèmes d'information

CCIN2P3

Centre de calcul de l'IN2P3

MCIA

Mesocentre de calcul intensif aquitain

INTRODUCTION

Le service informatique est un service transverse qui fournit le soutien informatique pour toutes les activités du laboratoire, ainsi que l'infrastructure informatique cohérente, performante et sécurisée nécessaire. Il est structuré pour répondre aux demandes des utilisateurs et aux contraintes de sécurité déterminées par la Politique de Sécurité des Systèmes d'Information (PSSI).



SES MEMBRES, FACILES À IDENTIFIER POUR LES UTILISATEURS, SONT DISPONIBLES ET RÉACTIFS.

ILS FONT LA FORCE DU SERVICE INFORMATIQUE EN ASSURANT UN SERVICE ADAPTÉ ET DE QUALITÉ.

LES MEMBRES DU SERVICE PRÉSENTENT DES COMPÉTENCES VARIÉES ET COMPLÉMENTAIRES, COUVRANT LES DOMAINES DE L'INFRASTRUCTURE (RÉSEAU, VIRTUALISATION, GESTION DE PARC) AU DÉVELOPPEMENT (BASE DE DONNÉES) TOUT EN INTÉGRANT LES CONTRAINTES DE SÉCURITÉ. POUR ÊTRE À LA POINTE DANS LEUR DOMAINE, ILS SUIVENT DES FORMATIONS RÉGULIÈREMENT ET ASSURENT UNE VEILLE TECHNOLOGIQUE.

ILS S'IMPLIQUENT DANS LA FORMATION AU CNRS (ÉCOLES CNRS) ET À L'UNIVERSITÉ (MASTER D'INSTRUMENTATION ET DE RECHERCHE). ILS PARTICIPENT AUX GROUPES DE TRAVAIL DU CNRS ET DE L'UNIVERSITÉ AINSI QU'AUX RÉSEAU MÉTIERS.

1

ENVIRONNEMENT

Service transverse aux activités variées du laboratoire, le service informatique évolue dans un environnement hétérogène: groupes de recherches en physique, chimie et biologie, services supports, plateformes d'analyse, cellules de transfert de technologie et enseignement.

Cette diversité de composantes génère des besoins variés. Ces demandes concernent par exemple les accès aux ressources : ressources de calcul locales ou distantes, ressources de stockage sécurisées et pérennes, ressources réseau pour les transferts de données. Elles concernent également l'utilisation de logiciels : logiciels spécifiques métiers (CAO mécanique, routage électronique), logiciels de simulation ou d'analyse choisis par les collaborations. Toutes ces demandes ont un impact fort sur la solution d'infrastructure mise en place pour répondre aux problématiques de performances.

Situé sur un campus excentré de l'Université, le CENBG dépend des tutelles du CNRS et de l'Université de Bordeaux. Il héberge des entités extérieures comme le labcom P2R ou la structure de transfert de technologie ARCANE. Cette structuration génère des contraintes de sécurités fortes.

Le service informatique a mis en place une PSSI et porte une attention particulière aux contraintes d'accès comme les accès aux données des projets et des plateformes. Il intègre également les contraintes de nos tutelles comme l'utilisation d'applications et de stockages institutionnels par exemple, ainsi que les contraintes du monde industriel pour les structures hébergées.

Quelques chiffres pour illustrer cette structure: 5 bâtiments sur un campus de 12 ha, 50 serveurs virtuels, 350 postes de travail ou d'acquisition et 150 comptes utilisateurs.

2

RÔLE ET MISSIONS
DU SERVICE INFORMATIQUE

Le service informatique recueille et analyse les besoins des utilisateurs et les contraintes de sécurité associées.

Il apporte un soutien actif aux expériences et aux structures hébergées, en proposant et gérant un accès aux ressources locales ou aux ressources des tutelles.

Il étudie, propose, teste, implémente et fait évoluer les solutions matérielles et logicielles adaptées. Cette démarche permet de créer et d'adapter une structure cohérente, basée sur une infrastructure performante et sécurisée, des postes de travail adaptés et optimisés.

L'activité du service informatique est centrée sur les fonctions d'appui aux groupes de recherche et à leurs projets ainsi qu'aux plateformes techniques.

3

CALCUL

Depuis quelques années le calcul est un point en fort développement au niveau du laboratoire. Les demandes émanant des groupes de recherches sont variées et nous ont amenés à proposer et implémenter des solutions adaptées: calcul en local ou sur les infrastructures de nos tutelles comme le Centre de Calcul de l'IN2P3 (CCIN2P3) et le Mésocentre de Calcul Intensif Aquitain (MCIA) ou distribution de machine virtuelle pour l'utilisation de Geant4 "clé en main".

Nous avons monté un cluster de calcul orienté développement de Geant4-DNA pour répondre aux besoins spécifiques de calcul et de développement de code. Ce cluster ouvert aux membres du laboratoire a permis de familiariser nos utilisateurs avec les notions de cluster de calcul. Cette expérience, qui arrive à son terme, a permis au service informatique de mieux cerner les besoins de nos utilisateurs, qui ont pu s'aguerir sur une petite structure locale optimisée pour leurs besoins.

Forts de cette expérience nous avons encouragé les utilisateurs à utiliser les infrastructures de calcul de nos tutelles. Le Centre de Calcul de l'IN2P3 est fortement utilisé par les grosses expériences et collaborations référencées à l'institut. Le MCIA est utilisé pour des calculs de projets locaux. Le service informatique réalise les installations de codes spécifiques demandées par ces expériences au MCIA dans des zones accessibles à la communauté (Smiley, Geant4 ou Espresso).

Le calcul peut également se faire localement sur de simples machines ou sur des serveurs dédiés avec des codes et des compilateurs spécifiques. Le service a développé dans le cadre de la collaboration avec le groupe de recherche Interface Physique Chimie pour le Vivant des machines virtuelles "clé en main", qui permettent aux utilisateurs d'avoir une machine linux entièrement configurée, avec tous les outils nécessaires pour l'utilisation des simulations des interactions des particules avec Geant4.

Le service est particulièrement réactif, en mettant à jour cette solution à chaque nouvelle version de Geant4. Ces machines sont disponibles au téléchargement, et sont régulièrement chargées par la communauté internationale. Elles sont également utilisées lors des écoles internationales de formation à Geant4.



La gestion des données des différents projets est un point crucial : données des projets, des expériences, des plateformes ou des structures hébergées. Les problématiques des données concernent aussi bien l'hébergement des données et leur sécurisation, la gestion des accès à des zones identifiées, la gestion de bases de données d'expériences que la gestion des versions des documents d'un projet. Des solutions locales ou mutualisées par nos tutelles sont conseillées et mises en place pour répondre aux mieux aux problématiques recensées.

Les données de projets doivent être suivies et référencées. Accessibles aux utilisateurs du laboratoire, des solutions de GED basées sur NUXEO sont proposées par l'IN2P3 (ATRIUM) et l'université de Bordeaux. Le CNRS a également mis en place des solutions de stockage de données partagées. En fonction des besoins et des contraintes des différents projets ou enseignements, le service informatique propose l'utilisation de la solution la mieux adaptée.

La gestion des données des plateformes d'expériences est un point particulier. AIFIRA est une plate-forme de faisceaux d'ions qui accueille des équipes de recherche mais permet également aux équipes locales de développer leurs programmes de recherche. Des moyens spécifiques ont été mis en place pour le réseau AIFIRA afin d'assurer sa sécurité et son indépendance par rapport au reste du réseau. Les utilisateurs de la plateforme ont accès uniquement à des postes de travail dédiés. La gestion des zones de données des différentes expériences est supervisée par le service instrumentation.

Le point clé de cette gestion est que l'utilisateur doit accéder uniquement aux zones de données des expériences sur lesquelles il est impliqué. Le service informatique a proposé et mis en place une solution sécurisée pour permettre aux différents utilisateurs de la plateforme de visualiser les données de leurs expériences depuis les terminaux dédiés dans la salle de contrôle. Cette solution permet également aux utilisateurs locaux authentifiés de gérer leurs zones de données. Tous ces accès se font via une application web, hébergée sur un serveur virtuel.

Le suivi des données d'expérience ou de gestion des plateformes est un besoin récurrent. Le service informatique a mis en place à la demande des groupes de recherche une solution de cahier électronique. Configurée à la demande en fonction de leurs besoins, et structurée pour permettre une délégation de droits d'accès par zone, l'utilisation de cet outil est en plein développement.

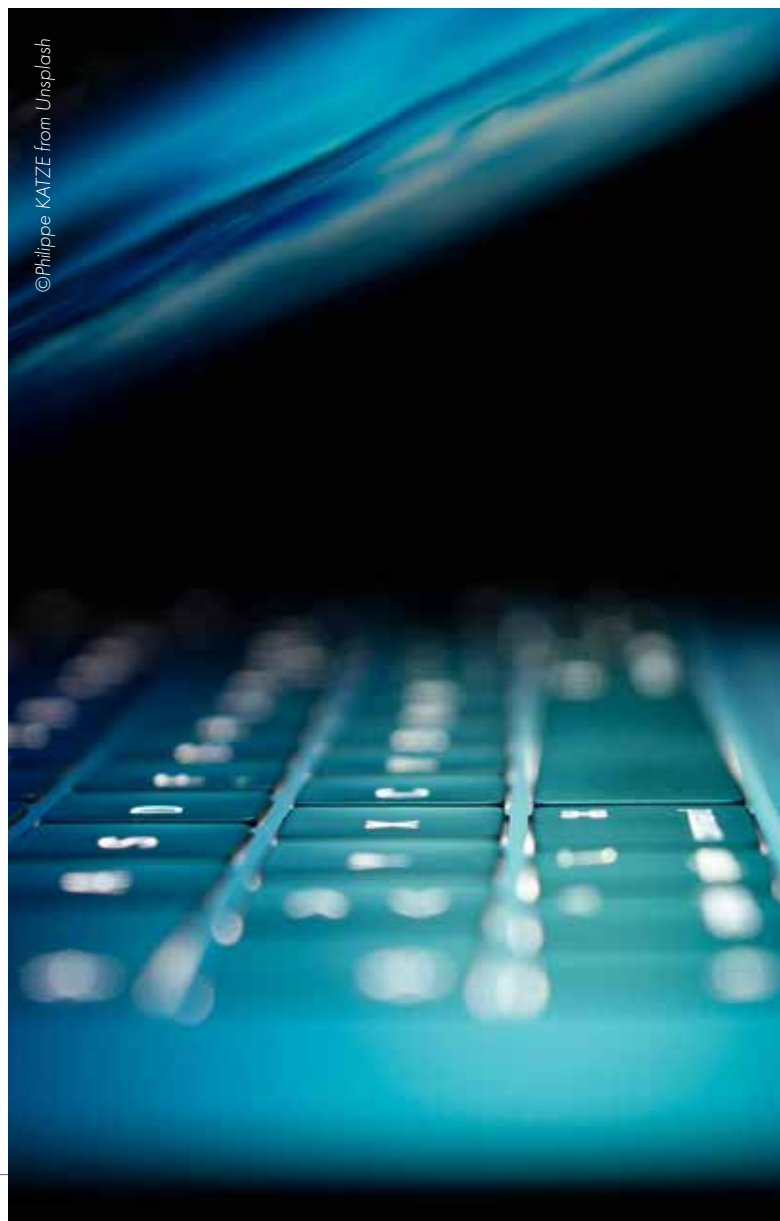
La problématique de la gestion des données est un questionnement en cours. Cette réflexion doit s'inscrire à la fois dans la problématique de gestion ouverte des données d'expériences, les contraintes du règlement général de la protection des données et les demandes avérées de Plan de Gestion de Données exigées par les contrats de financement.

Le laboratoire étant une Unité Mixte de Recherche, il dépend de plusieurs tutelles. Chaque tutelle propose des outils mutualisés ou collaboratifs. Le service informatique joue un rôle de conseil quant à l'utilisation de ces ressources, tant pour le choix de la ressource utilisée que pour son utilisation.

Le service informatique utilise les licences fournies par nos tutelles pour les logiciels d'intérêt général: calcul et simulation comme matlab ou maple, outil de développement comme Labview, logiciels métiers comme Catia ou Cadence. Le service informatique a migré en 2018 son hébergement de mails au Centre de Calcul de l'IN2P3 pour suivre la politique de l'institut. L'accompagnement des utilisateurs a permis une migration progressive en quelques mois. Nos utilisateurs ont donc deux adresses officielles: une à l'IN2P3 et une à l'université de Bordeaux, utilisée pour toutes les communications de l'université.

L'accès aux ressources informatiques est assuré depuis le laboratoire mais aussi pour les travailleurs nomades ou en télétravail. Le service informatique a mis en place une solution de VPN pour les agents en mission ou à domicile. Cette solution est utilisée pour les agents CNRS en télétravail.

©Philippe KATZE from Unsplash



6

INFRASTRUCTURE

Toutes ces activités informatiques sont adossées à une infrastructure cohérente et maîtrisée. Elle est adaptée aux contraintes du site, performante par l'utilisation de nouvelles technologies et sécurisée. La conception, la mise en place et le suivi de cette infrastructure permet le soutien de toutes ces activités d'appui à la recherche.

L'infrastructure s'appuie sur une ossature réseau sécurisée répartie sur cinq bâtiments, structurée en sous réseaux virtuels par un garde-barrière. Le réseau est réalisé autour d'un cœur de réseau qui permet de connecter l'ensemble des serveurs de la salle machine. Ce cœur de réseau a été restructuré en 2018 pour permettre d'atteindre des débits de 10Gb/s et d'assurer la continuité de service en cas de panne. L'ensemble des bâtiments est câblé et le renouvellement des commutateurs qui irriguent les bâtiments est le prochain projet réseau du site. Ce réseau filaire est complété d'un réseau Wifi, couplé à un portail captif pour permettre l'accueil des portables visiteurs. Un important travail de développement a été réalisé pour assurer le suivi de nos câblages et de nos fichiers de configuration réseau.

L'ensemble des services locaux s'appuie sur des serveurs virtuels et un serveur NAS de stockage. Cette solution mise en place depuis quelques années évolue régulièrement pour rester performante. Nous avons renouvelé en 2017 le serveur de stockage pour répondre aux problématiques de volume et d'accès aux données mais aussi en prévision de l'évolution de nos serveurs virtuels Vsphere (évolution en cours).

Nous utilisons le système de sauvegarde mis en place au CCIN2P3 pour sauvegarder journalièrement nos données essentielles. Une solution de sauvegarde locale de nos machines virtuelles basée sur Veeambackup a parallèlement été mise en place.

Tout le travail d'évolution de l'infrastructure se fait en intégrant les contraintes de sécurité. Nous avons pour cela fait évoluer le niveau de fonctionnalité de nos serveurs d'authentification Windows en 2016, ce qui permet d'être cohérent au niveau de la forêt IN2P3. La migration de notre serveur de mails au centre de calcul de l'IN2P3 en 2018 fait également partie de ce travail de maintien de niveau fonctionnel.

7

POSTES DE TRAVAIL

L'accès aux ressources informatique se fait principalement depuis le poste de travail de l'utilisateur. Les postes de travail du laboratoire sont adaptés aux besoins de l'utilisateur, installés et configurés par le service informatique. Ils sont sous Windows, Linux et MacOS.

Le service informatique a mis en place une solution d'inventaire basée sur GLPI et Fusion Inventory. Nous avons couplé cette nouvelle solution avec un inventaire physique des postes de travail et une mise à jour de nos bases en 2018. Cette base unique est la base de référence de notre parc informatique.

Outre les avantages d'un suivi facilité de notre parc, ce travail d'inventaire a servi de travail préparatoire pour la migration de notre parc de PC Windows vers Windows 10 et de nos PC Linux

vers CentOS7. Cet important travail de migration est encore en cours. Ces mises à jour sont motivées par des raisons de sécurité (système d'exploitation non maintenus) mais également par la volonté d'avoir un parc le plus homogène possible.

Le changement des marchés d'antivirus nous a poussés à passer de la solution de Symantec à celle de Kaspersky. Après une phase d'installation et de test de notre serveur, le déploiement sur notre parc informatique est terminé et opérationnel.

8

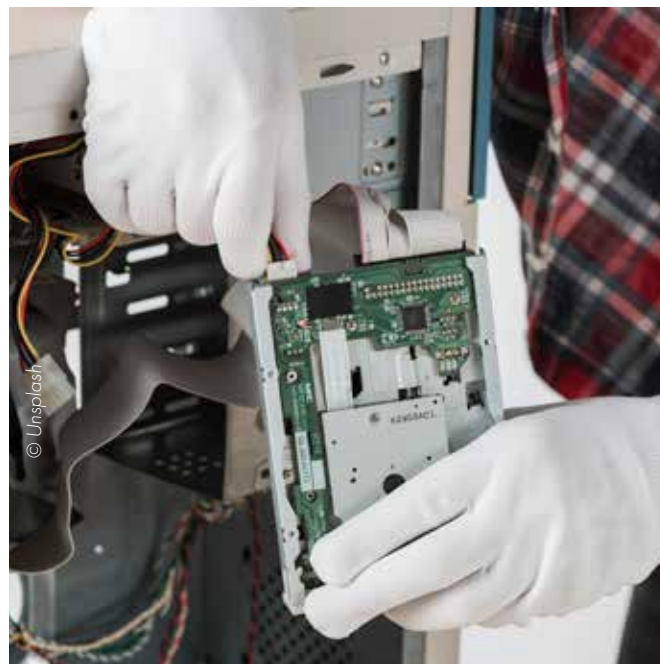
PROSPECTIVES DU SERVICE

Plus petit service du laboratoire, le service informatique réussit par ses compétences, son dynamisme et sa motivation à mettre en place une infrastructure fiable et performante.

La bonne connaissance de son environnement, sa proximité, son implication et sa réactivité permettent au service informatique de proposer les solutions les mieux adaptées en soutien des activités du laboratoire.

L'arrivée d'un nouveau bâtiment et la restructuration du laboratoire en pôles de recherches induisent une nouvelle dynamique qui donnera de belles opportunités d'évolution à l'informatique du laboratoire, en lien avec les politiques de nos tutelles.

Le service est moteur dans les réflexions sur les problématiques en cours et à venir comme les nouvelles approches de calcul, la politique de gestion des données ou la sécurisation des accès.



© Unsplash

INSTRUMENTATION ET DÉTECTEUR



ABSTRACT

Composed of eleven engineers and an engineering assistant, the instrumentation department designs and develops instrumentation devices mainly dedicated to particle and nuclear physics. Our activities are mainly carried out within the framework of national and international scientific projects involving CENBG research groups, but we also carry out transfer activities.

Our field of actions on the development of experimental devices covers project management, design, integration, control system, testing and validation. GANIL's SPIRAL2 program is a perfect illustration of this; for the past decade, our investment has been very significant there. We intervene on 4 work packages, and assume technical responsibility for some of them. On the 2015-2019 period, this program mobilized 3 to 4 FTE and allowed us to improve our skills while ensuring recognition and visibility on the IN2P3 level. This program's advancement gradually allows us to get involved on new projects, some of which are in R&D phase, leading us to work on internationally renowned installations. (CERN's Wisard, Appolon's Mistral, GSI's Sunrise and FAIR, Juno...)

The other side of our activities consists to monitor and ensure technical development of the CENBG's AIFIRA and PRISNA platforms, and act as AIFIRA's operational manager. In terms of business volume, if 1.5 FTEs are clearly assigned to the platform, the technical development leads us to increase our involvement by soliciting other engineers from the service.

We strive to remain at the forefront in our areas of expertise and to acquire new knowledge in response to new projects. The regular increase in our workforce allows us to increase our capacity to respond to the demands of research groups, both in terms of know-how and volume of activity. However, since the profession of automation-electrotechnician, combined with a booming activity, is carried out by only one engineer, a recruitment request has been made by the department.

RÉSUMÉ

Composé de onze ingénieurs et d'un assistant ingénieur, le service instrumentation conçoit et développe des dispositifs instrumentaux pour l'essentiel dédiés à la physique des particules et à la physique nucléaire. Nos activités s'accomplissent principalement dans le cadre de projets scientifiques nationaux et internationaux impliquant les groupes de recherche du CENBG en y alliant des activités de transfert.

Notre champ d'actions sur le développement de dispositifs expérimentaux couvre la gestion de projets, la conception, l'intégration, le contrôle-commande et la réalisation des tests et validation. Une illustration parfaite en est le programme SPIRAL2 du GANIL. Depuis une décennie, notre investissement y est très important. Nous intervenons sur 4 lots de travaux dont nous assurons la responsabilité technique pour certains. Sur la période 2015 – 2019, ce programme a mobilisé 3 à 4 ETP et nous a permis d'accroître nos compétences tout en nous assurant une reconnaissance et une visibilité au niveau de l'IN2P3. L'avancée de ce programme permet progressivement de nous impliquer sur de nouveaux projets, dont certains sont en phase de R&D, nous amenant à intervenir sur des installations de renommée internationale (Wisard au CERN, Mistral à Appolon, Sunrise et FAIR au GSI, Juno, ...).

L'autre pan de nos activités consiste à effectuer le suivi et le développement technique des plateformes AIFIRA et PRISNA du CENBG et à exercer la charge de responsable opérationnel d'AIFIRA. En terme de volume d'activité si 1,5 ETP sont clairement attribués à la plateforme, le développement technique nous amène à accroître notre implication en sollicitant d'autres ingénieurs du service.

Nous nous efforçons de rester à la pointe dans nos domaines de compétences et d'acquérir de nouvelles connaissances en réponse aux nouveaux projets. L'augmentation régulière de notre effectif nous permet d'accroître nos capacités à répondre aux sollicitations des groupes de recherche, tant en terme de savoir-faire qu'en volume d'activité. Cependant le métier d'automaticien-électrotechnicien, associé à une activité en plein essor, n'étant porté que par un seul ingénieur, une demande de recrutement a été formulée par le service.

RESPONSABLE DE SERVICE

Bertrand THOMAS

PERMANENTS

Philippe ALFAURT
Arthur BALANA
Hubert CHIRON
Gérard CLAVERIE
Laurent DAUDIN
Charles Edouard DEMONCHY
Benoît LACHACINSKI
Sébastien LEBLANC
Laurent SERANI
Stéphanie SORIEUL
Benjamin THOMAS

COLLABORATIONS

GANIL (SPIRAL2), IRSN (Amande), CEA (PETAL+)

INTRODUCTION

Deux grandes missions sont confiées au service instrumentation. Notre principale activité est la recherche et le développement de dispositifs instrumentaux et de bancs d'expérience plus ou moins complexes intégrant des outils de détection, de production de particules et de conduite de faisceaux. Le service assure également l'exploitation, le développement et la maintenance des plateformes PRISNA et AIFIRA.

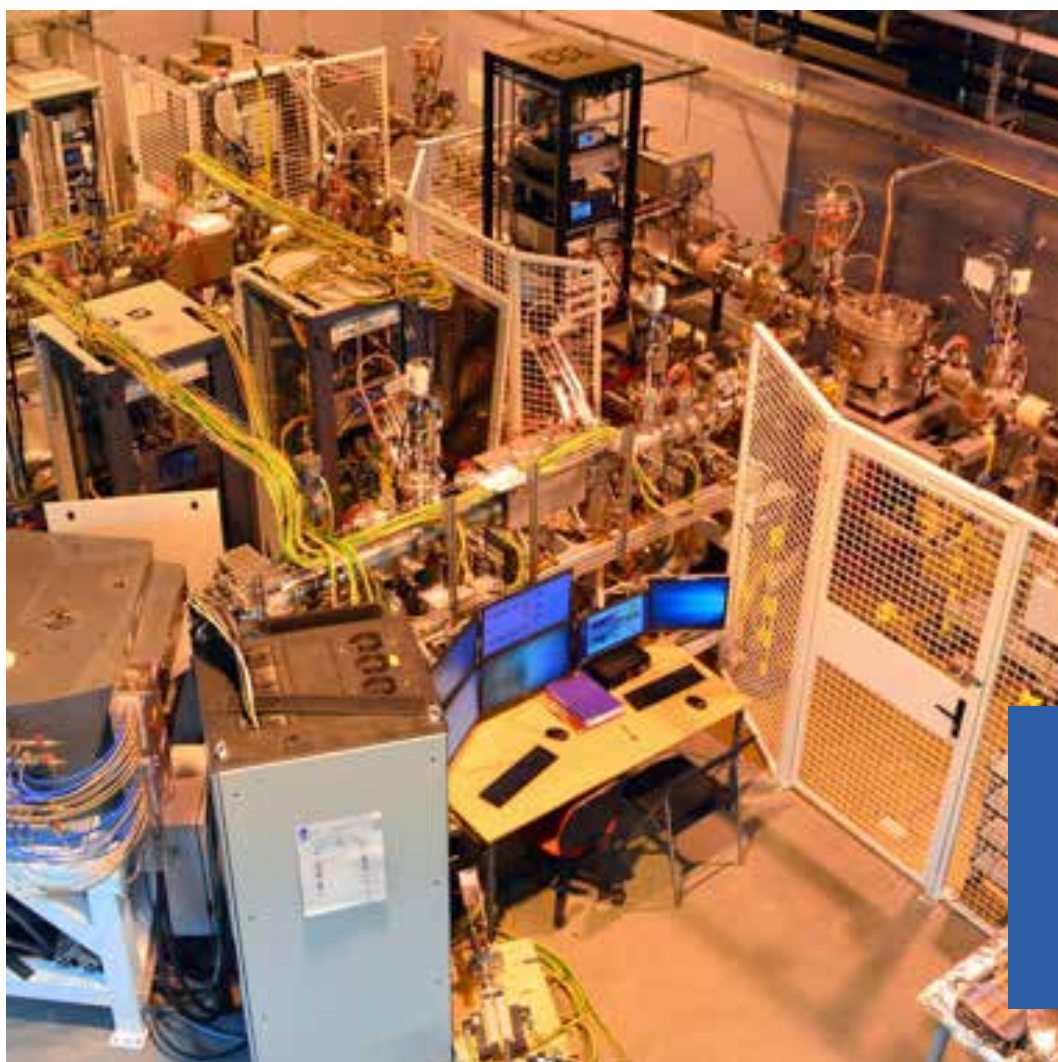
Pour accomplir les missions qui nous sont attribuées nous mettons en œuvre un large spectre de compétences allant de la gestion de projet, la mise en place d'outils de simulation et d'aide à la conception, la définition et l'intégration d'instruments, le développement des solutions de pilotage logiciel, couvrant l'automatisation et le contrôle-commande, jusqu'aux tests et validations des installations que nous réalisons.

SPIRAL 2
FORT VOLUME ETP

LIGNE IRSN
ACTIVITÉ
DE TRANSFERT

Enfin nous assurons également des activités transverses au sein du laboratoire et de nos organismes de tutelle puisque nous effectuons les fonctions d'assistant de prévention, personne compétente en radioprotection, responsable qualité, chargé de mission valorisation et directeur technique.

L'inventaire de nos projets souligne d'une part l'étendue des compétences que nous offrons et notre forte implication dans les développements techniques portés par les groupes de recherche du CENBG. Nos activités se réalisent en liens étroits avec ces groupes et en collaboration avec les autres services techniques du laboratoire.



HRS et PIPERADE
en développement
au CENBG

SPIRAL2 est une installation pour la production, l'accélération et la mise à disposition d'ions radioactifs qui permettra d'aborder les thématiques au sens large de la physique nucléaire. Son installation sur le site du GANIL à Caen est réalisée au travers de partenariats avec différents laboratoires de l'IN2P3 et du CEA.

Dans le cadre du programme DESIR@SPIRAL2 le CENBG développe quatre lots techniques impliquant une forte participation des services instrumentation et mécanique. Le premier lot est un spectromètre de masse haute résolution (HRS) qui sera installé aux confins des lignes de faisceaux transportant la production issue de S3 ou bien de Spiral1, et pour lequel le service instrumentation porte la responsabilité technique. Le second lot consiste à développer l'ingénierie système procédé et le contrôle-commande de l'ensemble des lignes de faisceau du programme DESIR. Le programme PIPERADE constitue le troisième lot. Ce projet, dont la finalité est de fournir aux expériences de DESIR des faisceaux d'ions radioactifs très purs, est porté par le groupe Noyaux EXOtiques (NEXO) du CENBG et a reçu le soutien financier de l'ANR et de la Région Aquitaine. PIPERADE nécessitant un conditionnement préalable du faisceau d'ions, un dispositif GPIB (General Purpose Ion Buncher) est essentiel et correspond au quatrième lot.

High Resolution Separator (HRS)

Installé en amont de la salle d'expérience DESIR, ce spectromètre de masse doit assurer une très haute sélectivité en masse des ions radioactifs produits par S3@SPIRAL2 et Spiral1@GANIL. Constitué de 2 dipôles magnétiques et de lentilles électrostatiques en symétrie miroir, il est conçu pour avoir une résolution de 20 000.

En mettant en œuvre les outils de conception, le service instrumentation a co-défini le design optique de ce dispositif et a contribué à la définition des contraintes de réalisation des divers éléments le constituant en déterminant les niveaux critiques de perturbations potentielles (optiques et mécaniques). Après avoir défini les équipements annexes (groupes de pompes, moteurs, alimentations...) et les avoir intégrés au HRS, le service a assuré leur automatisation et l'ensemble du contrôle-commande dans le cadre général du CC DESIR@SPIRAL2. Nous développons actuellement l'interface homme machine en intégrant les algorithmes de réglages permettant de corriger les aberrations d'ordre élevé. Après la caractérisation en émittance d'une source dédiée, le commissioning via des mesures de systématique débutera en 2020.

Contrôle Commande lignes DESIR

Le programme DESIR comprend le déploiement de cent vingt mètres de lignes de faisceau alimentant en ions radioactifs les différentes expériences. Ces lignes sont pourvues de nombreux équipements tels que les groupes de pompage, les fentes motorisées, les diagnostics, les alimentations de courant et de hautes tensions... Le lot contrôle-commande consiste à réaliser l'intégralité du système de pilotage de ces équipements, ce qui couvre l'automatisme, le contrôle-commande et l'interface homme-machine. Le service instrumentation dispose d'une compétence reconnue dans ce domaine que nous avons renforcée ces dernières années en s'auto-formant à l'environnement EPICS employé sur l'accélérateur SPIRAL2.

PIPERADE

PIPERADE (Piège de Penning pour des ions Radioactifs à DESIR) a pour objectif la construction d'un double piège de Penning destiné à purifier et accumuler jusqu'à 10^5 ions ce qui en soit est déjà un défi. Ce dispositif, qui sera installé dans le Hall DESIR du GANIL, doit assurer la séparation isobarique des ions radioactifs avant de les envoyer vers les autres lignes d'expérience et peut assurer la détermination de leurs masses avec une très grande précision.

Conçu par le MPIK à Heidelberg en collaboration étroite avec le laboratoire, PIPERADE est constitué de 2 pièges de Penning, le premier purifiant les paquets d'ions radioactifs, le second les stockant. Installé dans nos locaux en 2018, ce dispositif a nécessité au préalable de la part du service une forte activité sur la définition des équipements nécessaires à son fonctionnement. Ce travail a consisté à définir, choisir, développer et intégrer groupes de pompage, générateurs de fonctions, sources de polarisation haute tension, transformateur de séparation, cordons et connectiques, automates programmables industriels, communication réseau et cartes d'acquisition... Le piège de Penning nécessitant un champ de 7 teslas, un aimant supraconducteur refroidi par hélium liquide complète l'installation ce qui implique un suivi régulier du maintien en froid (gestion et approvisionnement des fluides), la mise en œuvre d'un système de contrôle et d'alerte sur la quantité des fluides cryogéniques, des mesures de stabilité du champ magnétique et le développement d'un électron-gun permettant l'alignement des pièges avec l'axe du champ magnétique.

Nous assurons également le développement de cartes électroniques de commutation rapide de tensions élevées, de cartes d'amplification et de déphasage (phase splitter) et de l'électronique de l'électron-gun. Ce travail a en partie été réalisé par des étudiants d'EEA de l'Université de Bordeaux que nous accueillons chaque année.

Enfin un ingénieur a entrepris en 2019 le développement du contrôle-commande EPICS de PIPERADE.

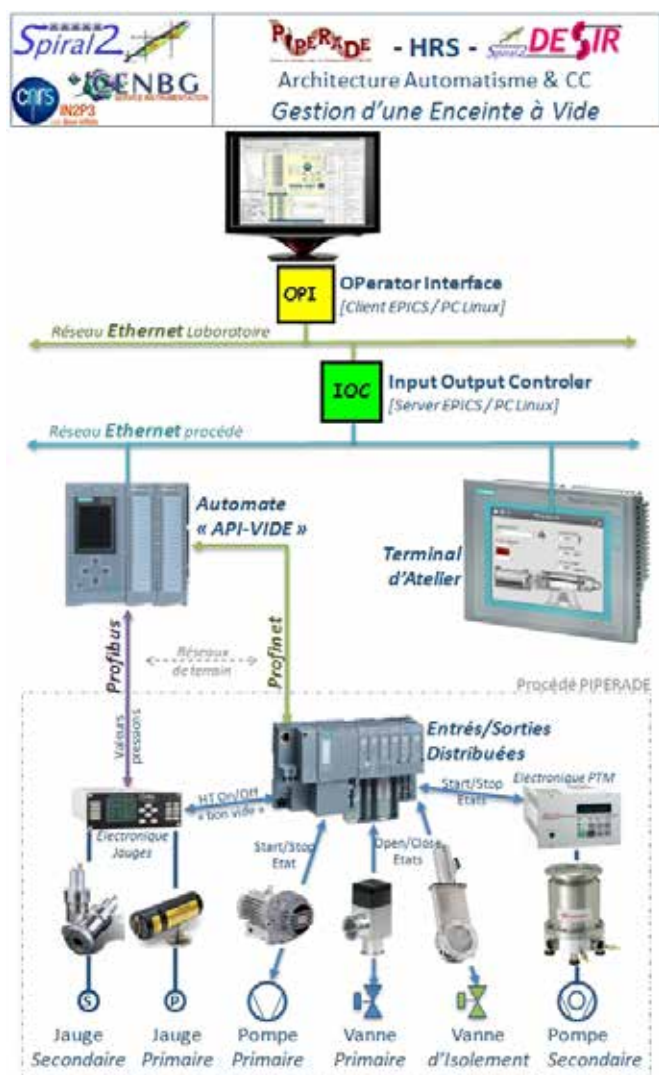
GPIB

Le double piège PIPERADE ne peut atteindre pleinement sa fonction de purificateur des ions radioactifs qui lui sont fournis que si certaines conditions sont présentes: 1) les ions doivent être sous forme de "paquets" parfaitement définis en temps ; 2) le faisceau d'ions doit avoir une très faible divergence et une faible dispersion en énergie. A cette fin, en amont de PIPERADE est installé un quadripôle radiofréquence (RFQ) refroidisseur-regroupeur nommé GPIB (General Purpose Ion Buncher). Son principe s'appuie sur l'action de refroidissement par un gaz tampon neutre (He) pour absorber efficacement par collision élastique l'excès d'énergie transverse du faisceau d'ions injecté. Pour cela, il est nécessaire de confiner et de guider le faisceau via un champ électrique radiofréquence fourni par le RFQ et un champ électrique longitudinal.

Après avoir construit le circuit LC générant les tensions radiofréquences, le service instrumentation a conçu et développé des solutions permettant de tester et qualifier le GPIB. Les mesures ont été réalisées par un émittance-mètre ALISSON et ont permis de caractériser le faisceau refroidi et d'optimiser les réglages du GPIB. Nous avons également dû effectuer des développements logiciels et électroniques sur l'émittance-mètre pour mener à bien ces expériences.

Ces développements apportés par le service se sont appuyés sur la mise en œuvre d'automates pour la gestion du vide, des organes de sécurité (contrôle d'accès d'une plateforme à 60 kV) et le contrôle de la source d'ions stables destinée aux tests et validation du GPIB. Un premier contrôle-commande de cet ensemble a été écrit en labview afin de réaliser ces tests. Pour intégrer ce dispositif au CC format SPIRAL2, une migration de ce contrôle-commande sous l'environnement EPICS est en cours de réalisation.

Le projet WISARD (Weak Interaction Study with ^{32}Ar Decay) a pour objectif scientifique d'observer les courants scalaires d'un noyau atomique par mesure de décroissance de l' ^{32}Ar dans un champ magnétique intense. Porté par le groupe Noyaux EXOtiques (NEXO) du CENBG, l'Université de Leuven et le LPC Caen, le projet technique consiste à recommissionner la ligne d'expérience WITCH du Hall ISOLDE du CERN. Le service instrumentation a effectué dans un premier temps la mise en fonction des groupes de pompage, leur rénovation et leur automatisation. Des automates programmables ont également été installés pour assurer le contrôle sécurisé de l'ensemble source et de la plateforme haute tension et pour motoriser les outils de diagnostic et diaphragmes sur la ligne de faisceau. Enfin après avoir défini et mis en œuvre les solutions modulaires des alimentations hautes tensions et les outils de mesure d'intensité, nous avons développé le contrôle-commande de ces équipements permettant la caractérisation et le réglage du faisceau d'ions. En octobre 2018, une première expérience de faisabilité s'est avérée concluante et a validé les solutions techniques.



L'accélération d'ions lourds jusqu'à des énergies de quelques dizaines de MeV est une nécessité pour l'étude du noyau atomique. L'arrivée des lasers de puissance à hauts taux de répétition apporte l'opportunité de répondre à ce besoin lorsqu'ils sont associés à des jets de gaz ultra-denses. Il serait ainsi possible de produire des ions de plusieurs dizaines de MeV en quantité supérieure à celles obtenues sur cibles solides. Dans ce contexte, le groupe Excitations Nucléaires par Laser du CENBG développe des projets financés par le GdR APPEL et l'ANR Pinnacle, portant sur la génération de jets de gaz (MISTRAL pour Micro-Integrated Supersonic gas-jet Target for Repetitive ion Acceleration with Laser) et le développement d'outils de détection des particules générées. L'objectif étant de proposer des équipements pouvant être déployés sur les lasers de puissance tels qu'Appolon, CLPU, ELI,...

Le service instrumentation contribue au développement du dispositif de génération du jet de gaz supersonique mais intervient plus spécifiquement sur la problématique de l'extraction des gaz. En effet, un des challenges consiste à générer un jet de gaz temporaire ultra-dense (10^{21} atomes/cm³) dans les chambres de réaction des lasers devant être maintenues sous vide (10^{-5} mbar). Chaque "bouffée" de gaz introduisant une quantité d'atomes 100 000 fois supérieure à l'initial, il est nécessaire de développer une solution innovante ce qui implique la mise en œuvre d'outils de simulation de mécanique des fluides, la conception, la construction d'un banc de test et la validation d'un système d'extraction complet. Nous participons par ailleurs à l'élaboration des outils de détection qui seront employés lors de ces expériences.

Dans l'objectif de mesurer les sections efficaces des réactions induites par neutrons, le groupe Aval du Cycle Energie Nucléaire (ACEN), porte un projet de R&D sur un dispositif d'étude de réactions nucléaires par mesures de substitution en cinématique inverse sur anneaux de stockage d'ions lourds. Cet équipement consiste en un système de détection basé sur une technologie de pointe et sur une approche nouvelle pour mesurer avec précision les probabilités de désexcitation des ions lourds sur l'anneau CRYRING de GSI/FAIR. Une des originalités techniques de ce projet consiste à utiliser des cellules photovoltaïques pour la mesure des fragments de fission.

Notre principale activité dans ce projet consiste à rendre compatible ce dispositif avec les contraintes d'extrême Ultra-vide des anneaux de stockage (XHV, 10^{-12} mbar). Le principal challenge consiste à utiliser les cellules photovoltaïques comme fenêtres actives isolant l'XHV de l'anneau du vide secondaire régnant dans les pockets où sont installés l'électronique de pré-acquisition et le câblage. À cette fin un banc de test (TREVO) a été construit permettant de définir les taux de dégazage des différents matériaux utilisés dans l'anneau de stockage et de valider l'étanchéité du dispositif de support des cellules photovoltaïques. Nous assurons également la définition des équipements de pompage du dispositif de détection et leur automatisation.

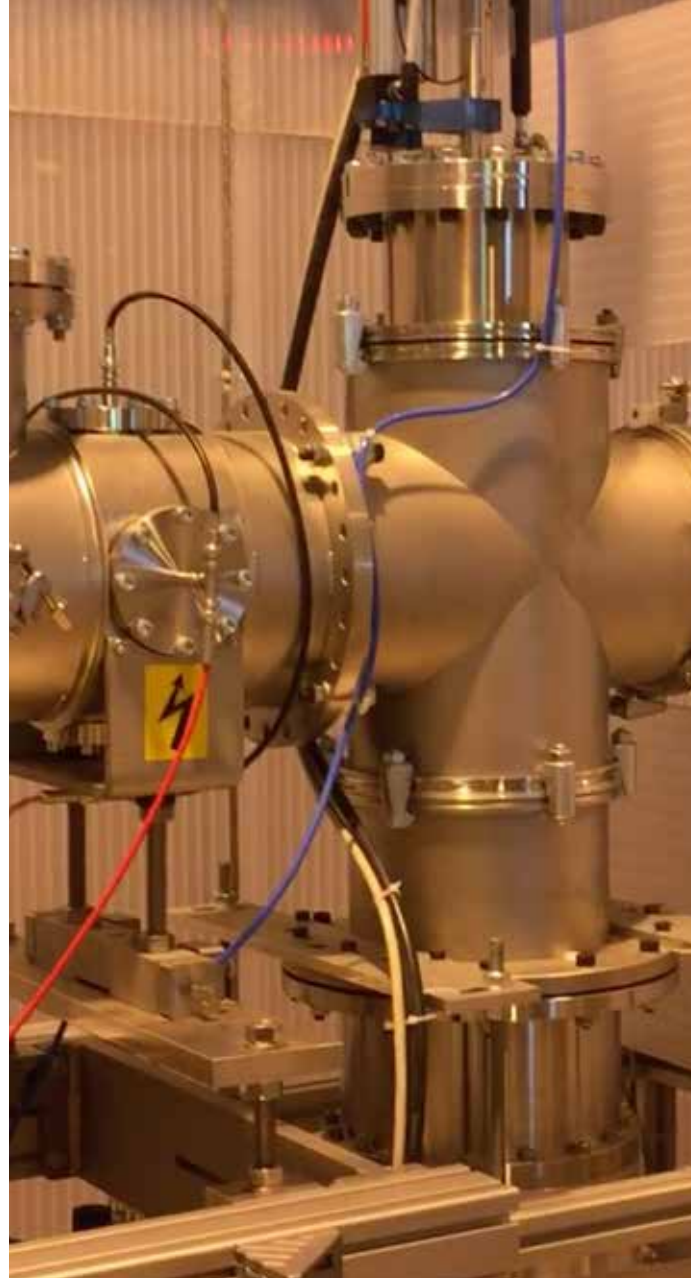
Le projet de construction du Facility for Antiproton and Ion Research – FAIR – au GSI à Darmstadt est une collaboration internationale. Il comprend un accélérateur en anneau (SIS 100), d'une circonférence de 1 100m pouvant accélérer tous les ions produits à partir des éléments du tableau périodique jusqu'à 99% de la vitesse de la lumière, deux anneaux de stockage et plusieurs lignes sur lesquels sont distribués plusieurs points d'expériences. Des antiprotons et des isotopes spécifiques y seront produits.

Dans le cadre d'une collaboration croisée France-Allemagne le CNRS via l'IN2P3 doit fournir en In Kind une quarantaine d'alimentations de puissance (3 à 60 kW). Le CENBG au travers de deux membres du service Instrumentation est opérateur de cet accord.

Nous devons donc fournir au GSI quarante et une alimentations de puissance pour alimenter, en mode pulsé, les charges électromagnétiques du proton Linac dans sa zone moyenne énergie (3 - 68MeV). L'expression du besoin et les spécifications techniques sont sous la responsabilité du GSI, le CENBG est opérateur du contrat sur la passation des marchés et le suivi jusqu'à la SAT (Site Acceptation Test) en passant par les différentes étapes administratives et techniques (jalons projet pour le déclenchement au passage des étapes techniques et pour le déclenchement des paiements).

Le Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO) est une expérience dont l'objectif principal est la détermination de la hiérarchie de masse du neutrino. Le projet technique consiste à construire un détecteur de neutrinos produits par 2 centrales nucléaires situées à équidistance. Enterré à 700 mètres de profondeur, ce détecteur sera constitué de 20 000 tonnes de liquide scintillant environné par plus de 50 000 photomultiplicateurs immergés.

Le CENBG est impliqué dans cette collaboration internationale via la gestion de lots techniques, consistant à développer les cartes électroniques associées aux petits photomultiplicateurs (25 000 - PM de 3"). La contribution du service instrumentation consiste pour l'essentiel à effectuer les tests thermiques sur ces cartes afin d'assurer que leur durée de fonctionnement, fortement dépendante de la température, est compatible avec le déroulement de l'expérience estimé à 15 ans. Nous avons également effectué l'instrumentation d'une cuve de pression destinée à valider l'étanchéité des underwater boxes, dans lesquelles seront installées les cartes électroniques.



Porté par le groupe Neutrino et Basses Radioactivités, le projet R2D2 (Rare Decays with Radial Detector) est une R&D sur la détection de la désintégration double bêta sans émission de neutrino. Ce phénomène, si observé, prouvera que le neutrino est une particule de Majorana, pièce fondamentale dans la compréhension de la physique des neutrinos. Le projet est d'utiliser une chambre à projection temporelle (TPC) sphérique remplie de gaz à haute pression pour observer cette décroissance. L'avantage de cette nouvelle technique est tout d'abord sa simplicité puisque le détecteur sera constitué d'un seul canal de lecture et ensuite la possibilité d'avoir la quantité de gaz suffisante pour observer la décroissance dans un petit volume.

Le service instrumentation porte la responsabilité technique du projet et apporte sa compétence sur la technologie du vide et des gaz sous pression. Afin de garantir la pureté du gaz (xénon), il est primordial d'obtenir un vide préalable suffisamment bas, en particulier en terme de teneur en oxygène, pour assurer un très faible bruit de fond compatible avec la sensibilité recherchée.

Le CENBG a assuré durant la période de phase 1 de l'Equipex la mission et la fonction de Chef de projet pour le maître d'ouvrage (Université de Bordeaux).

L'objectif de cet Equipex était de fournir un ensemble de diagnostics pour la qualification du Laser Petal (laser petawatt en Aquitaine), dispositif qui vient compléter les possibilités offertes par le LMJ (Laser Mégajoule). Le problème majeur de l'utilisation d'un laser Petawatt est que lors de l'interaction avec la cible une impulsion électromagnétique géante est créée interdisant toute utilisation de diagnostics dits actifs. L'ensemble des diagnostics "Petal+" est donc passif. Un autre problème vient du fait que ces diagnostics sont utilisés dans la chambre sphérique (10 mètres de diamètre) de l'installation LMJ et que pour les amener au centre de cette enceinte, un système d'insertion (SID) doit être utilisé dans un contexte d'installation nucléaire de base ce qui rend assez lents les accès aux diagnostics et aux capteurs passifs (IP- image Plate) utilisés pour la détection. Il ressort de ce point que le commissioning de chaque partie des instruments doit absolument être fait en amont pour pouvoir disposer de modèles aidant à l'interprétation.

Durant la phase de développement il est apparu un point dur sur la qualification de la voie basse énergie (100 keV-20 MeV) du détecteur SEPAGE qui est un système à double paraboles de Thomson. Le CENBG a réalisé la partie AIT-V (Assemblage, Intégration Tests Validation) de cette voie basse énergie. Pour cela un set up a été réalisé en utilisant une caméra CCD haute résolution associée à un détecteur MCP/écran Phosphore pour la partie mesure. Une série d'expériences sur l'accélérateur AIFIRA (1-3 MeV) et sur le Tandem d'Orsay (3-22 MeV) ont permis de bien comprendre son fonctionnement, de lever le doute sur l'aimant permanent de 500 Gauss et donc d'affiner le modèle théorique de cet ensemble ce que nous recherchions. Ce travail a donné lieu à trois publications et a permis la conclusion d'une thèse.

Ligne IRSN
©Francesco Acerbis | IRSN

Ce projet est une activité de transfert technologique consistant à reproduire, tout en y apportant des améliorations, la ligne de micro irradiation cellulaire développée par nos soins sur la plateforme AIFIRA du CENBG. Ce transfert sur l'accélérateur d'ions AMANDE de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) s'est effectué via une collaboration scientifique entre nos 2 instituts.

L'installation de cette ligne d'expérience s'est déroulée fin 2015, les tests et validation ont été effectués en 2016. Nous avons néanmoins poursuivi cette collaboration en 2017 par le développement d'un logiciel de comptage destiné à la dosimétrie de neutrons sur l'installation AMANDE.

Le CENBG dispose de deux plateformes dont le fonctionnement est assuré pour partie par le service instrumentation:

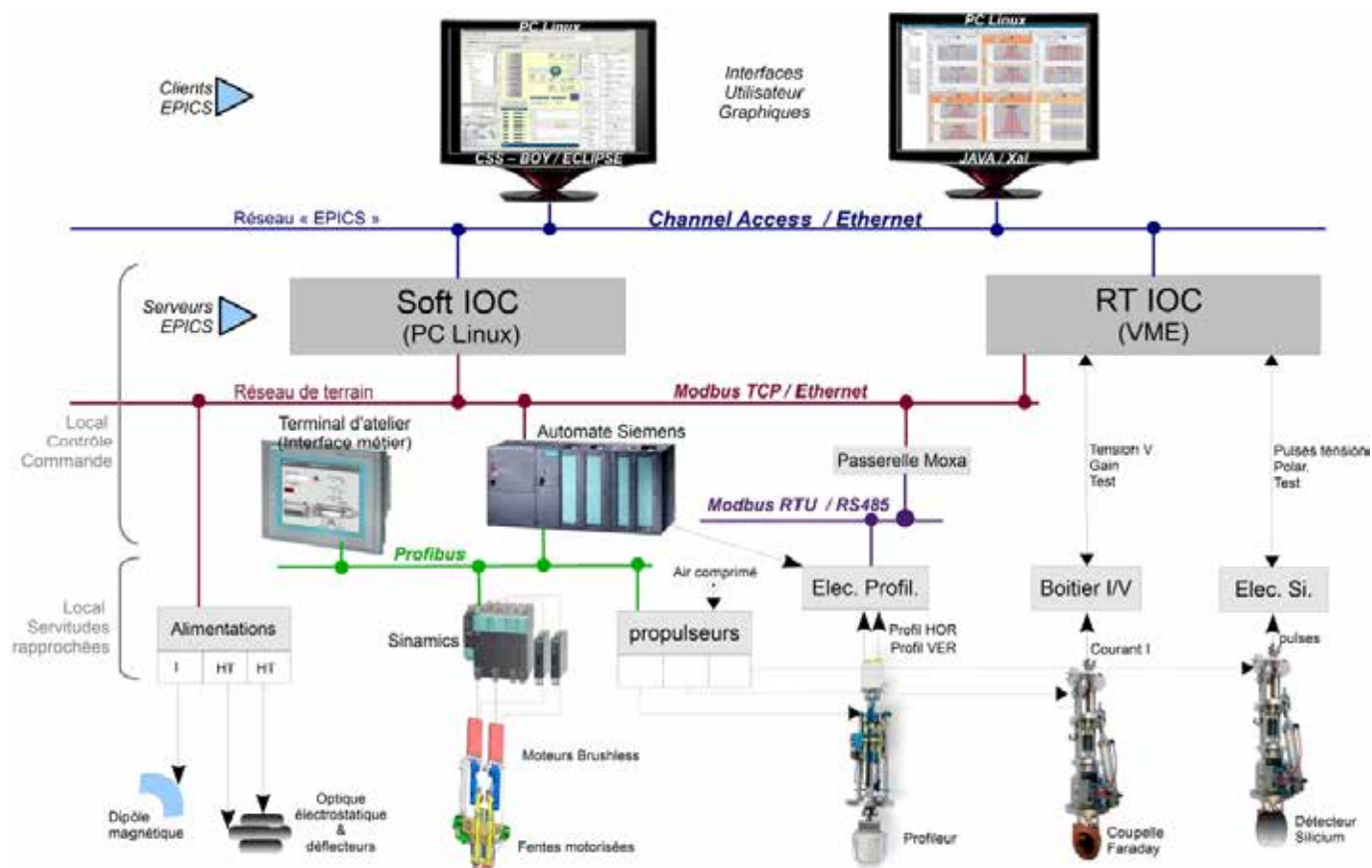
- AIFIRA (Applications Interdisciplinaires des Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine) est une plateforme d'analyse et d'irradiation par faisceau d'ions légers dans le domaine du MeV labellisée IN2P3 et Université de Bordeaux. Constituée de 5 lignes d'analyses, elle dispose d'un ensemble d'outils de détection (PIXE, RBS, NRA, ERDA et PIGE) lui permettant de couvrir une large gamme de thématiques de recherche issues de disciplines variées. Cette structure fournit plus de 3000 heures de faisceau par an aux utilisateurs, ce qui la place en terme de temps d'exploitation parmi les plus performants accélérateurs au niveau national.
- PRISNA (Plateforme Régionale Interdisciplinaire de Spectrométrie Nucléaire en Aquitaine) est une installation semi-enterrée composée de quatre détecteurs gamma très bas bruit. Dédiée aux mesures de très faibles radioactivités, elle est rattachée au réseau Becquerel.



Le service instrumentation assure les responsabilités technique et opérationnelle d'AIFIRA. Ayant eu la charge de la construction de la plateforme, nous en effectuons l'entretien et continuons à la développer en assurant une veille technologique nous permettant de répondre aux demandes nouvelles des expérimentateurs. Ainsi, un projet de jouvence d'une ligne dédiée à la physique nucléaire et à la production de neutrons (projet MIAMI) est en cours et consiste à refaire la ligne de faisceau et la boîte objet en collaboration avec le service mécanique, à changer les groupes de pompage et les systèmes de motorisation et de développer un nouveau contrôle-commande permettant une amélioration de la maintenance et de la conduite de faisceau d'ions. Notre activité sur AIFIRA représente globalement un volume de 1,5 ETP.

Le service instrumentation a la responsabilité technique également de la plateforme PRISNA ce qui signifie que nous en assurons la maintenance et contribuons aux développements techniques de ses équipements.

Architecture CC HRS



Daudin, L., Thomas, B., "PIPERADE at DESIR", CS Framework Workshop, GSI Darmstadt, Allemagne, 21 Mars 2016

Sorieul S., Daudin L., Alfaut, P., Balana, A. "La plateforme AIFIRA: Automatismes & C/C", IBAF (Ion Beam Applications Francophone) 2016, Annecy, France, 27-30 Septembre 2016

Balana, A., Alfaut, P., Daudin, L., Sorieul, S., "Carthelem: a Data Acquisition Software for Ion beam Analysis and Cartography", IBA, Shanghai, Chine, 8 - 13 Octobre 2017 (Affiche)

Sorieul, S., Daudin, L. "Ligne Microfaisceau dédiée à la caractérisation", IBAF, Nouan-le-Fuzelier, France, 24- 28 Septembre 2018 (Affiche)

Daudin, L., Guégan H., "La détection du rayonnement X produit par un faisceau d'ions rapides. La théorie et la pratique: le vécu et l'avenir ...", IBAF (Ion Beam Applications Francophone) 2018, Nouan-Le-Fuzelier, France, 24-28 Septembre 2018

Daudin, L., "The SPIRAL2 DESIR Facility under EPICS control", International EPICS collaboration Meeting, ITER-Cadarache, France, 3-7 Juin 2019

Daudin, L., "Défis techniques du projet PIPERADE", Journée du département Science de la Matière et du Rayonnement, Université de Bordeaux, France, 7 Octobre 2019

Serani, L., Méot, F., Abell, D., "Electrostatic Devices in Zgoubi: Magneto-Electrostatic spectrometer, Wien filter spin rotator, ExB Nanoprobe", Zgoubi workshop, 2019, Boulder, USA, 26-30 août 2019

MÉCANIQUE



ABSTRACT

The Mechanical department (BEFM) is one of the 4 technical and engineering department of CENBG. The service has 8 agents spread over 2 entities: the mechanical design office (5 agents) and the mechanical production team (3 agents). Its role is to design and produce experimental devices for the research teams of the laboratory or for national and international collaboration projects. We also work on R & D project.

RÉSUMÉ

Le Service Bureau d'Etudes et Fabrication Mécanique (BEFM) est l'un des 4 services techniques et ingénieries du Laboratoire. Le service compte 8 agents réparti sur 2 entités: le bureau d'études mécaniques (5 agents) et l'équipe de réalisation mécanique (3 agents). Son rôle est de concevoir et réaliser des dispositifs expérimentaux pour les équipes de recherche du laboratoire ou pour des projets de collaborations nationales et internationales. Nous intervenons également dans le cadre de projet de R & D.

RESPONSABLE DE SERVICE

Mathieu ROCHE

PERMANENTS

BUREAU D'ÉTUDES

Thierry CHIRON

Franck DELALÉE

Amélie FOURNIER

Serge LIST

Sean PERARD

ATELIER MÉCANIQUE

Fabrice MESPLES-CARRERE

Francis MUNOZ

Jean OUTREQUIN

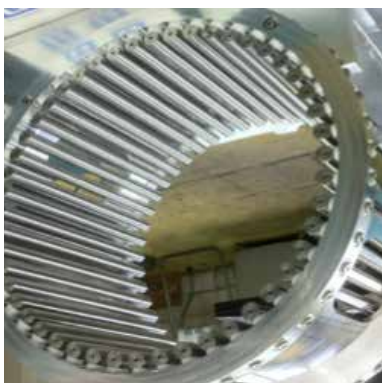
Anne TEMPEL



INTRODUCTION

Le service mécanique du CENBG comprend 5 ingénieurs au bureau d'études et 1 ingénieur, 1 assistants ingénieurs et 1 techniciens à l'atelier. Tout en appartenant à la "communauté service" les mécaniciens collaborent aux projets scientifiques du laboratoire au sein d'équipes techniques. Dans cette organisation matricielle, certains ingénieurs du bureau d'études sont responsables techniques de projet. Les membres du service gèrent les actions de R&D, de conception, de prototypage et tests, de suivi de fabrication interne et externe, d'installation, de mise en service sur les sites expérimentaux, de maintenance et de démantèlement.

Conception et réalisation sont intimement liées dans nos projets. Tous les membres de l'équipe sont partie prenante dans les développements. Les assistants ingénieurs et techniciens assurant la réalisation et le montage sont associés à la conception et les concepteurs suivent les travaux de fabrication et d'installation. Les membres du service interviennent généralement sur plusieurs projets.



Éléments optiques du HRS
(quad-quad, hexaquad, multipole)

1

MOYENS

Les 5 agents du bureau d'Études utilisent le logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) CATIA V5. Ce logiciel permet de faciliter les travaux sur des systèmes mécaniques complexes et de collaborer avec d'autres laboratoires nationaux et internationaux. La gestion des données est assurée avec la base SMARTTEAM intégrée à CATIA ce qui permet des échanges aisés entre les différents laboratoires de l'institut.

Les calculs par éléments finis dans les domaines statique et thermique sont assurés avec le logiciel ANSYS. Récemment, nous avons acquis le logiciel FloTherm nous permettant d'intervenir sur des problématiques plus complexes en calcul thermique et thermomécanique.

Les 3 agents de l'atelier de mécanique maîtrisent tous les types de machines conventionnelles (tours, fraiseuses...). Nous sommes également équipés d'un centre de fraisage à commande numérique (HURCO) associé au logiciel de Fabrication Assistée par Ordinateur (MasterCAM) qui nous permet de réaliser des pièces complexes. L'atelier réalise aussi des pièces mécano soudées, sur TIG ou MIG, qui peuvent être utilisées sous vide secondaire. L'assemblage et la mise au point mécanique des ensembles réalisés sont également assurés par les équipes du service. Ils sont souvent amenés à se déplacer sur les différents sites d'expériences

2

LE SERVICE AU CŒUR
DES PROJETS RÉCENTS

Sur ces dernières années, le service mécanique du CENBG a été fortement impliqué dans le développement de lignes de faisceaux d'accélérateurs dans le cadre du projet SPIRAL2 mais il est également engagé sur des projets de réalisations de détecteurs dans le domaine des astroparticules et des neutrinos. Il développe aussi des dispositifs pour les différentes campagnes d'expériences des équipes de recherche du laboratoire.

SPIRAL 2

Le CENBG intervient sur différents lots majeurs du projet SPIRAL2 : le HRS, le RFQ cooler et le piège de penning (v figure). Ces développements sont assurés par les équipes mécaniques et instrumentation du laboratoire. Les différentes activités effectuées par le service sur ces projets sont détaillées figure 1.

HRS

Ce spectromètre de haute résolution a pour fonction principale de purifier en masse les faisceaux radioactifs produits et utilisé pour le hall d'expériences DESIR de SPIRAL2 à un niveau souhaité de $1/20000$.

Sur ces 4 dernières années, les différents ingénieurs du bureau d'études ont développé les derniers éléments optiques constituant la ligne (fente de définition, multipole...). L'assemblage de l'intégralité de la ligne a été réalisée par le service mécanique et instrumentation du laboratoire. L'ensemble des conceptions réalisés sur ce projet ont répondu aux exigences imposées pour une installation nucléaire de base. Cet instrument complexe est installé dans le hall de montage du CENBG où il est actuellement caractérisé. Il sera ensuite installé au GANIL pour son exploitation.

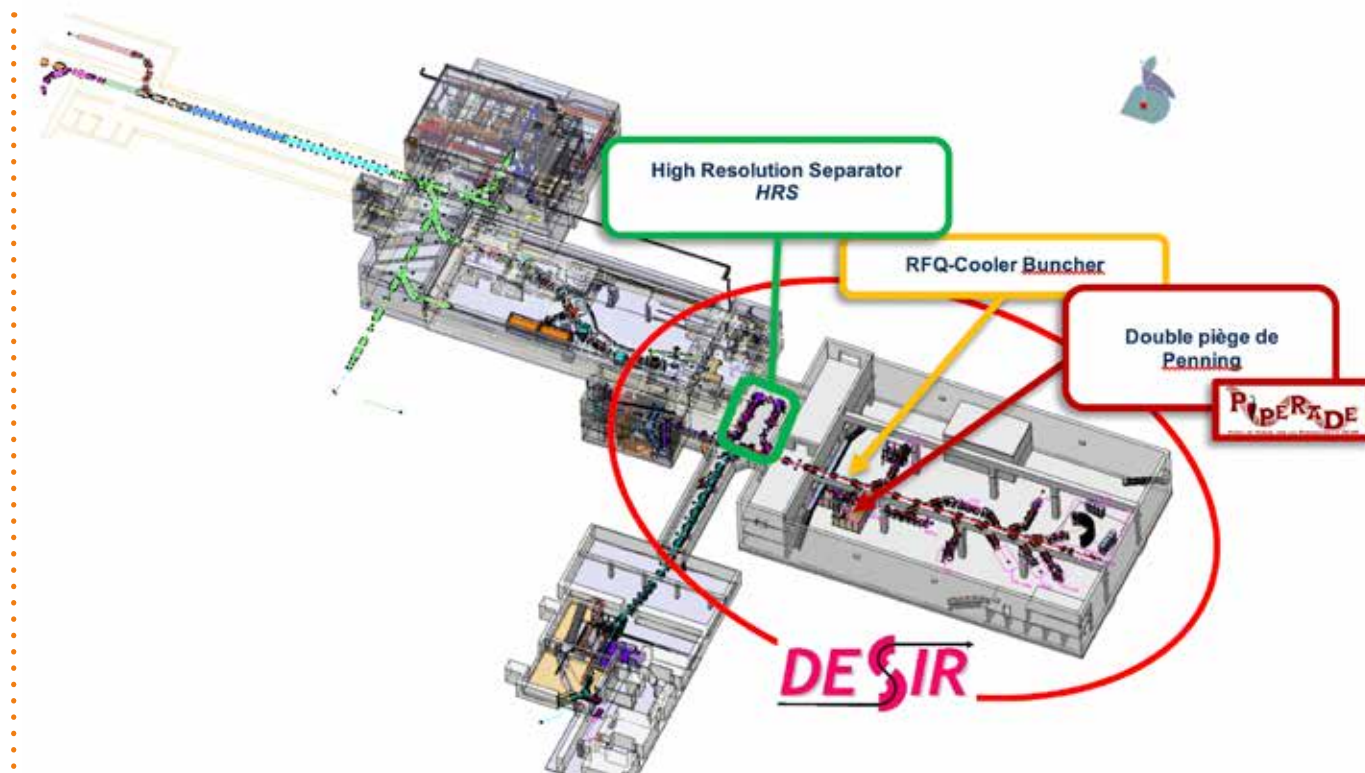


FIGURE 1

PIPERADE et HRS dans le futur hall DESIR du GANIL

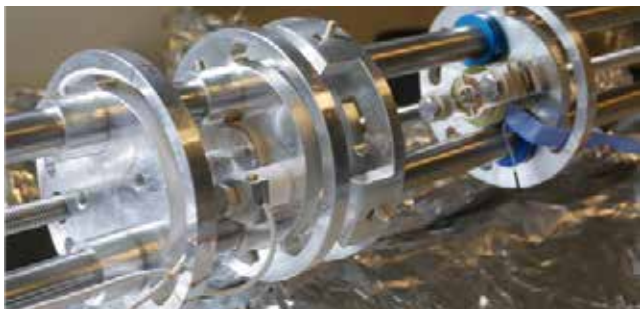


FIGURE 2 *Éléments principaux de l'électron gun*



FIGURE 3 *Piège de penning au CENBG*

PIPERADE

Le groupe Noyaux Exotiques (NEX) du CENBG a en charge le développement d'un double piège de Penning, qui sera situé à l'entrée du hall DESIR. Il servira à purifier les faisceaux issus de S3, SPIRAL2 ou SPIRAL existant. Ce développement est un complément au séparateur magnétique classique type HRS. Le service mécanique est fortement impliqué dans ce développement qui comprend une source d'ions stable, d'un quadrupole radiofréquence (GPIB), et du piège de Penning. Cette collaboration concerne 4 laboratoires: CENBG, CSNSM, IPNO et MPIK Heidelberg.

Dans la continuité des développements effectués sur le GPIB, nous avons poursuivi nos études pour accueillir le piège de penning, un des éléments principal de cette ligne de purification. Depuis 2015, nous avons donc réalisé les différents éléments diagnostiques faisceau de la ligne (Cage de faraday, MCP...) ainsi que les différents châssis support (châssis Trap, châssis baie HT). Tous ces éléments sont confinés dans une cage haute tension pouvant supporter des tensions jusqu'à 30kV. Après avoir reçu le piège de penning en 2017 (figure 2), une phase importante d'intégration et d'alignement des éléments optiques a été initiée. Toutes ces actions ont été réalisées en collaboration avec le service instrumentation du laboratoire.

Afin de calibrer le champ magnétique du piège de penning, un électron gun a été conçu et mis au point par le service et les membres de l'équipe NEX (figure 3).

Tous les éléments de la ligne sont désormais opérationnels pour les phases de qualification.

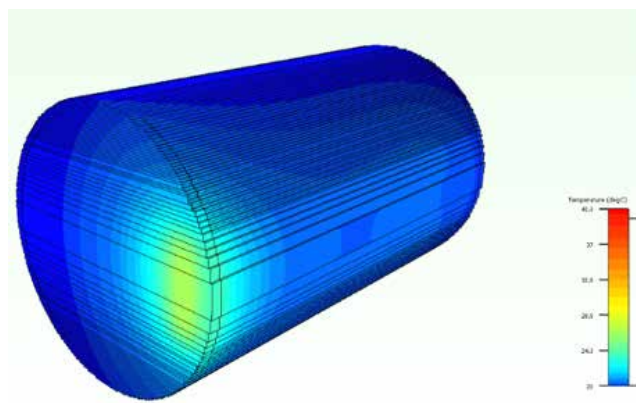
JUNO

JUNO, pour "Jiangmen Underground Neutrino Observatory", sera le plus gros détecteur de neutrinos à scintillateur liquide du monde. JUNO est un détecteur de neutrino à ligne de base intermédiaire, placé à 53 km des neutrales nucléaires de Yangjiang et de Taishan, dans un tunnel situé à 700m de profondeur. Il est constitué d'une sphère en verre acrylique de 35.4 m de diamètre remplie de 20.000 tonnes de liquide scintillant. La sphère est entourée par 17.000 photomultiplicateurs de 20 pouces de diamètre (51 cm, appelés Large PMTs or LPMT) et 25.000 photomultiplicateurs de 3 pouces (7.6 cm appelés Small PMT or SPMT). Le détecteur est immergé dans une piscine d'eau instrumentée avec 2000 LPMT agissant comme veto pour les muons.

Depuis 2017, le service mécanique du CENBG est investi sur le lot SPMT du projet international JUNO. Nous avons en charge le développement des under water box (UWB), container étanche accueillant les cartes électroniques alimentant et récoltant les signaux des petits photomultiplicateurs de l'expérience. Immergé dans un bassin d'une quarantaine de mètre de diamètre sur 40 de haut, ces caissons sont soumis à des pressions de l'ordre de 4bars.

Plusieurs prototypes ont été conçus et fabriqués pour tester l'étanchéité du système ainsi qu'étudier sa fiabilité après vieillissement accéléré.

En collaboration avec le service électronique du laboratoire, des simulations thermiques sur les cartes ABC ont été réalisées à l'aide des logiciels ANSYS et FloTHERM. Ces études ont permis de fiabiliser le système en intégrant des dispositifs d'évacuation de chaleur sur les composants les plus contraints (figures 4).



Echauffement de l'UWB



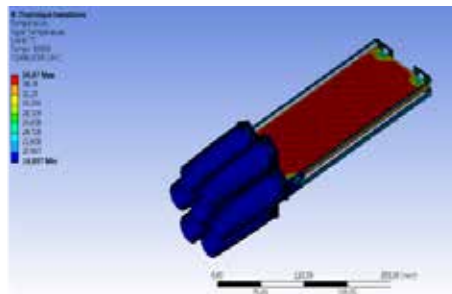
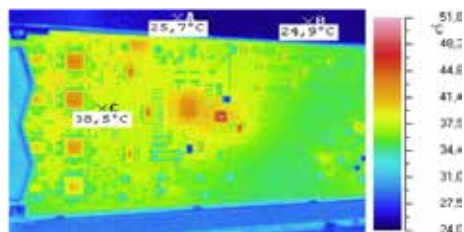
FIGURE 4 *Echauffement de la carte ABC*

CTA NECTARCAM

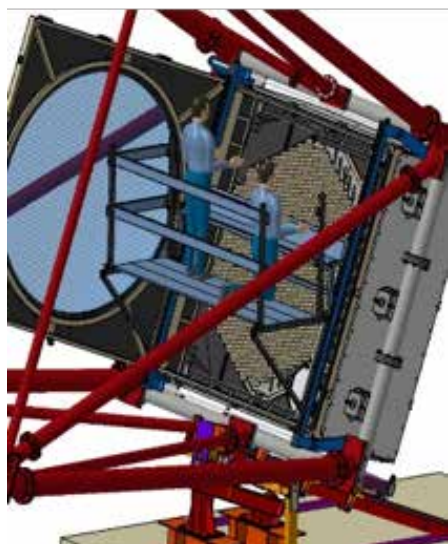
Depuis 2019, le service est engagé sur le projet d'astroparticules CTA NectarCAM. La NectarCAM est une des caméras qui est proposée pour équiper les télescopes de taille moyenne du futur observatoire CTA (Cherenkov Telescope Array). Elle sera alors constituée de 265 modules (1855 photomultiplicateurs). En France, ce projet est mené dans le cadre d'une collaboration entre le CEA (IRFU) et le CNRS (IN2P3 et INSU) avec un soutien des Labex P2IO, OSUG2020 et OCEVU.

Le service mécanique du CENBG a en charge 2 lots sur ce projet. Le 1er lot concerne la conception et la réalisation de la face avant de la caméra comprenant un shutter, un hublot en PMMA et un système d'ouverture hydraulique facilitant la maintenance. Tous ces éléments sont montés sur une structure mécano soudée de 3m sur 3m. L'ensemble doit être étanche et doit répondre aux exigences de durée minimale d'intervention sur site, nous étudions et proposons les solutions de maintenance optimales. Nous gérons la production et le montage des 15 ensembles qui doivent être installés sur un des observatoires du consortium CTA.

L'autre lot dont nous avons la responsabilité consiste en la réalisation de simulations thermiques afin d'optimiser les gradients de température au sein de la caméra.



Etude thermique module FPM CTA NectarCAM



Scénario de maintenances CTA NectarCAM

Montage des différents éléments du détecteur ACTAR TPC



ACTAR TPC

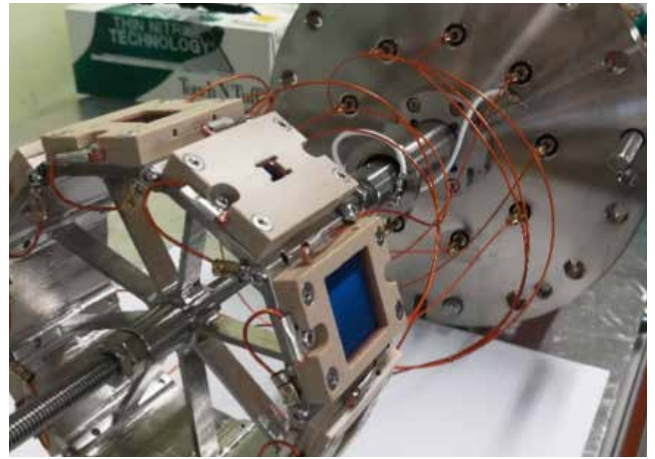
Le service est impliqué sur la réalisation d'une seconde TPC (Time Projection Chamber) pour le groupe Noyaux Exotiques. Cette nouvelle TPC a un système de détection constitué d'un plan de pads beaucoup plus grand. Ce plan de pads est fixé sur le fond de chambre et assure la fonction de tenue au vide. Elle est percée de micro-trous de 0.7mm de diamètre pour le passage des pins du circuit. Cette plaque d'aluminium, percée de 18896 trous, a été calculée pour résister à l'effort du vide et réalisée dans une société spécialisée. Nous avons conçu et réalisé l'ensemble des pièces mécaniques du dispositif.

SUNRISE

Le projet SUNRISE (Set-Up for Nuclear Reaction studies at Ion StorageE rings) vise à développer un système de détection basé sur une technologie de pointe et une méthode très innovante pour déterminer des sections efficaces induites par neutrons de noyaux très instables. Les expériences auront lieu d'abord auprès des anneaux de stockage de l'installation internationale GSI/FAIR. Le projet SUNRISE évolue dans le cadre d'une collaboration internationale avec GSI/FAIR, l'Institut Max-Planck de Physique Nucléaire de Heidelberg et l'Université de Francfort.

Dans le cadre de ce projet utilisant des technologies de détection innovantes constitué de cellules photovoltaïques, les premiers travaux ont été de caractériser ces cellules. Un dispositif de propulseur tournant a donc été conçu, réalisé et installé pour une série d'expériences utilisant l'accélérateur du GANIL à Caen.

L'ingénieur du bureau d'études a également évalué les ressources pour répondre aux demandes ANR et ERC du projet. Des études de faisabilité sont en cours de réflexion pour intégrer l'ensemble des contraintes optiques du système mais également répondre aux contraintes d'ultra vide et l'intégration du système de gas jet.



Propulseur rotatif pour la caractérisation de cellules photovoltaïques



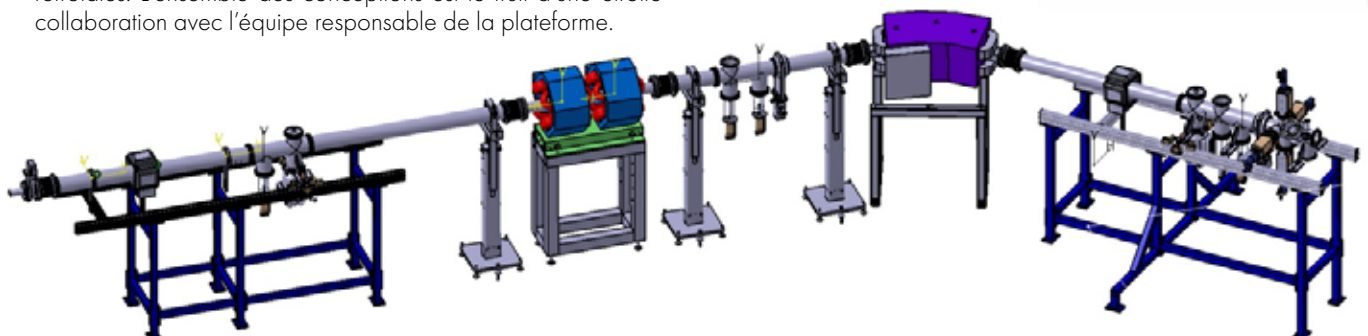
Vue des ensembles de la ligne neutronique en phase d'assemblage au laboratoire



MIAMI

Dans le cadre du renouvellement de la ligne neutronique de la plateforme accélérateur du laboratoire (AIFIRA), nous avons pris en charge les développements et la fabrication des éléments mécaniques constituant cette ligne. Elle intègre différents diagnostics faisceaux et des fentes de définition faisceau refroidies. L'ensemble des conceptions est le fruit d'une étroite collaboration avec l'équipe responsable de la plateforme.

Vue d'ensemble de la ligne neutronique de la plateforme AIFIRA



R2D2

Pour ce projet piloté par le groupe neutrino du laboratoire, nous avons été amené à concevoir une enceinte de géométrie interne sphérique de 200 mm de rayon supportant une pression interne de 40 bars. Elle intègre un dispositif d'étalonnage mobile comprenant une source d'électrons (canne porte source) et un capteur alimenté en haute tension (20kV). L'objectif de cette expérience est de vérifier que l'on peut atteindre une résolution meilleure que 1% à 1 MeV pour des électrons.

Différents calculs par éléments finis ont été réalisés pour optimiser la géométrie et répondre aux critères directives appliquées aux équipements sous pression. Cette enceinte sphérique a été entièrement fabriquée dans nos ateliers de fabrication (usinage et chaudronnerie).

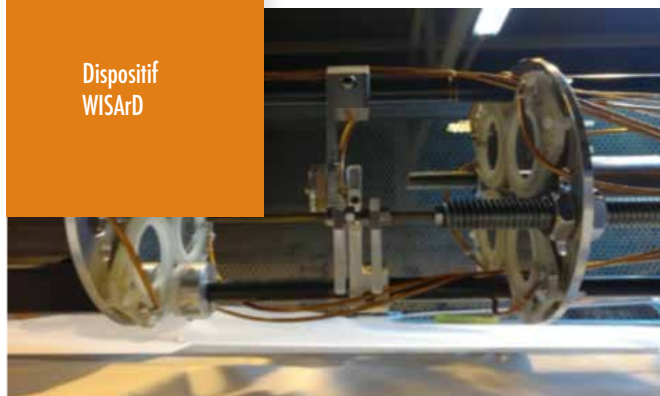


La Sphère R2D2 en phase d'Études et en condition opérationnelle

WISArD Weak Interaction Studies with ^{32}Ar Decay

Ce projet issu d'une collaboration entre le CENBG et l'université de KU LEUVEN en Belgique est installé dans le hall d'expériences ISOLDE au CERN. Elle utilise l'ancien aimant supraconducteur WITCH de 4 Teslas. Le dispositif développé et fabriqué par le service est une tour de 2m70 de long intégrant le catcher lieu de la réaction à étudier, une cage de Faraday et une MCP. Ces différents éléments sont intégrés sur des supports rotatifs pilotable manuellement au sommet de la tour. Concernant la détection, plusieurs détecteurs silicium sont intégrés au système. Les contraintes de magnétisme, d'encombrement restreint, de vide et de maintenabilité ont été les points importants à prendre en compte pour la réalisation de ce dispositif. Des travaux de R et D pour l'optimisation des détecteurs silicium est en cours (intégration, refroidissement...).

Dispositif
WISArD



3

ACTIVITÉS DE R&D

Les activités de recherche et développement du service sont toutes liées à des projets du laboratoire. Elles se déclinent selon deux thématiques majeures:

- "Détecteurs", qui rassemble toutes les activités de R & D sur les études de nouveaux systèmes de détection des particules, mais également sur les nouveaux concepts qui utilisent des techniques de détection déjà éprouvées.
- "Matériaux", qui rassemble les activités de recherche sur la mise en œuvre des nouveaux matériaux utilisés pour les diverses instrumentations des expériences, incluant les études sur leur usinage, collage, moulage, etc...

4

ACTIVITÉS TRANSVERSES

Les membres du service mécanique assurent également la responsabilité ou la coordination technique de projets. Le service mécanique dispose d'une grande expertise dans le domaine de la CAO (CATIA V5) et de la gestion de base de données techniques (smarteam). Nous avons été fortement impliqués dans le projet de renouvellement des outils CAO à l'IN2P3 (projet ROC3) en participant au groupe de travail mis en place.

Le service propose aussi aux autres laboratoires de l'université de Bordeaux des prestations pour de petites études et la réalisation d'ensembles mécaniques.

Nous sommes également impliqués dans la diffusion et la transmission du savoir aux étudiants au travers des enseignements (DUT, Licence Pro) dispensés par certains membres du service et en accueillant chaque année des stagiaires au bureau d'études et à l'atelier de fabrication.

Les ingénieurs du service participent et coordonnent les actions nationales des différents réseaux mises en place au sein de l'institut ou au CNRS (réseau des mécaniciens, réseau calcul mécanique IN2P3...).

Certains agents sont également impliqués dans les jurys de concours ou commission administrative paritaire du CNRS.

B. Blank et al., Half-life and branching ratios for the β decay of ^{39}Ca , Eur. Phys. J. A 51, 8 (2015)

C. Magron et al., Precise measurements of half-lives and branching ratios for the β mirror transitions in the decay of ^{23}Mg and ^{27}Si , Eur. Phys. J. A 53, 77 (2017)

A. Fournier "Sphère sous pression - projet R2D2". école mécanique IN2P3 "Dimensionnement des liaisons mécaniques (soudure / boulonnerie)" ,16 au 20 septembre 2019 à Fréjus.

RADIOPROTECTION

ZON



ACCES REGLEMENTE

**ZONE
DELIMITEE
AUTORISEE SEULEMENT
AU PERSONNEL
HABILITE**



**STOCKAGE
RADIOACTIF
ACCES
REGLEMENTE**

ABSTRACT

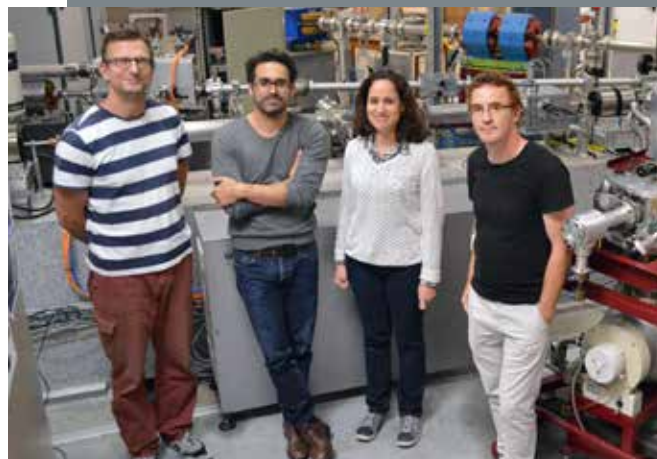
The aim of the Service Compétent en radioprotection (SCR) is to ensure enforcement of the radiation safety legislation at the CENBG where half of the 110 workers are exposed to ionizing radiation. The radiation safety officers (PCR) have an advisory role with the Director of the CENBG. The SCR defines and applies a program of radiological inspections in order to verify that personal dosimetry, doses rates and contamination monitoring are compliant with existing regulations. These inspections relate to the AIFIRA facility (accelerator with 5 beam lines), one X-ray generator and almost 260 radioactive sources and nuclear materials. These activities are spread over five radiological zones and 16 rooms authorized for the use of radioactive sources. The inspections also cover 25 radiation protection instruments and the radioactive wastes of the CENBG. An important part of our work is to identify the needs of the research groups and services in order to implement new solutions to comply with the regulations: defining radiological zones, protective equipment, radiation protection instruments, radioactive material transportation (import/export), etc. The regulatory follow-up is essential and the SCR writes the files concerning the authorizations required by government agencies. SCR also teaches radiation protection at the CENBG, Universities and private companies.

RÉSUMÉ

La mission première du Service Compétent en Radioprotection (SCR) est de garantir la radioprotection des 110 personnes qui composent le laboratoire et dont la moitié est exposée aux rayonnements ionisants. A cet effet, les Personnes Compétentes en Radioprotection (PCR) qui composent le service exercent un rôle de conseil auprès du Directeur du CENBG. Dans ce cadre réglementaire précis, le SCR définit, organise et applique le programme de contrôles et de vérifications radiologiques et de sécurité pour l'accélérateur de particules et les cinq lignes de faisceau de la plateforme AIFIRA, un générateur de rayonnement X et près de 260 sources radioactives scellées, non scellées et matières nucléaires. Ces activités sont réparties dans trois zones surveillées, deux zones contrôlées et 16 salles autorisées à la manipulation de sources. Les contrôles couvrent également un parc de 25 appareils de radioprotection ainsi que le suivi des déchets radioactifs. Une activité importante du SCR est d'identifier les besoins des équipes et services afin de proposer des solutions qui répondent aux obligations réglementaires: zonage, aménagement des postes de travail, équipements de mesure, suivi dosimétrique, organisation des transports (import/export) de matières sensibles, gestion des décontaminations, démantèlement et incidents. Le suivi réglementaire de ces activités est essentiel et le service instruit les dossiers d'autorisation auprès des autorités concernées. Le service exerce également une activité de formation et de conseil en radioprotection au laboratoire et à l'extérieur auprès de l'Université, d'entreprises ou d'institutions.

PERMANENTS

Huber CHIRON
Ludovic MATHIEU
Stéphane ROUDEAU
Stéphanie SORIEUL



Les principales fonctions du service de radioprotection sont les suivantes :

- *Instruction des autorisations auprès des autorités : Autorité de sûreté nucléaire (ASN), Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN), Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA)*
- *Evaluation de l'exposition du personnel, respect des limites de dose*
- *Formation du personnel*
- *Dosimétrie du personnel et d'ambiance*
- *Réalisation des contrôles internes mensuels et externes annuels (débits de dose, recherche de contamination, contrôles administratifs)*
- *Gestion des sources radioactives (Achat/Emprunt/Transport)*
- *Gestion des matières nucléaires, "Préposé à la Garde des Matières Nucléaires" (PGMN, Code de la Défense)*
- *Gestion des déchets radioactifs*
- *Gestion du parc d'appareils de radioprotection*
- *Nouveaux besoins des utilisateurs*

INTRODUCTION

Le CENBG possède une autorisation délivrée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) pour la détention et l'utilisation de sources radioactives scellées et non scellées, l'importation et l'exportation de radionucléides sous forme de sources radioactives scellées et non scellées et pour l'utilisation des accélérateurs, aux fins de recherches non médicales. Cette autorisation d'une validité de cinq ans détaille toutes les conditions d'utilisation des rayonnements ionisants mis en œuvre par les équipes et services du laboratoire. Le titulaire de l'autorisation est le Directeur du CENBG.

Les Personnes Compétentes en Radioprotection (PCR), regroupées au sein du service SCR, sont des personnels permanents de l'unité. Le service est composé de Stéphane Roudeau (IR CNRS), chef du service SCR et membre du groupe Imagerie Chimique et Spéciation et Hubert Chiron (IE Université de Bordeaux), membre du service Instrumentation. A l'automne 2019, deux nouvelles PCR prendront officiellement leur fonction et remplaceront les PCR actuelles, Stéphanie Sorieul (IR CNRS) du groupe Instrumentation et Ludovic Mathieu (CR CNRS) du groupe Aval du Cycle et Énergie Nucléaire.

Bilan des enjeux en termes de sources de rayonnements, personnels exposés et locaux autorisés.
Le SCR veille au respect de la réglementation en radioprotection auprès des différentes sources de rayonnements ionisants du laboratoire. Les enjeux sont résumés dans le tableau suivant:

SOURCES DE RAYONNEMENTS IONISANTS (émissions X, alpha, bêta, gamma, neutron)

- 1 accélérateur de particules (alpha, protons, deutons ; Emax 3,5 MeV), 5 lignes de faisceau dont une ligne dédiée à la production de champs neutroniques et de gamma
- 1 générateur X
- 262 sources radioactives scellées, non scellées et matières nucléaires, 43 radionucléides autorisés

PERSONNELS EXPOSÉS

- 50 à 55 personnes classées catégorie B
- Bilan dosimétrique 12 derniers mois:
dosimétrie passive: 50 agents, 410 doses, toutes <0,02mSv
dosimétrie opérationnelle: 796 doses, toutes <0,02mSv

LOCAUX CONCERNÉS

- 7 bâtiments, 16 salles: trois zones surveillées, deux zones contrôlées

1

SUIVI ADMINISTRATIF,
INSTRUCTION DES AUTORISATIONS

L'autorisation ASN du CENBG a été renouvelée en 2016 et reste valable jusqu'en mai 2021. Ce renouvellement a nécessité la rédaction par le SCR d'un dossier technique de plus 300 pages soumis à l'examen de l'ASN ainsi que de nombreux échanges. En complément de ce renouvellement, trois mises à jour d'autorisation ont été instruites depuis 2015 et le laboratoire a fait l'objet d'une inspection ASN en octobre 2019. Les délais de montage des dossiers soumis à l'ASN ainsi que la durée de l'instruction par l'autorité (jusqu'à six mois) nécessitent d'anticiper au plus tôt l'évolution des besoins des équipes et services du laboratoire.

Chaque année, le SCR transmet à l'IRSN un inventaire exhaustif de ses sources de rayonnements ionisants. Un inventaire distinct des matières nucléaires et de leurs mouvements (code de la défense) est également transmis à l'IRSN dans le cadre des missions de préposé à la garde des matières nucléaires (PGMN) assurées par le chef du SCR. Les déchets radioactifs produits par le laboratoire font l'objet d'une déclaration annuelle à l'ANDRA.

Un autre volet de cette activité est le suivi dosimétrique des agents via la base de données Siseri de l'IRSN: le SCR saisit et met à jour les données administratives de tous les agents suivis, des médecins du travail et du correspondant Siseri de l'employeur. Les données de dosimétrie opérationnelle reçues au CENBG sont également transmises à l'IRSN. La dosimétrie passive des agents du laboratoire a été assurée par le service de dosimétrie de l'IPN d'Orsay et a été confiée à l'IRSN en septembre 2019.

Afin de faciliter le suivi de la radioprotection, le SCR a développé des bases de données relationnelles sous Filemaker qui permettent la gestion des sources radioactives, des matières nucléaires, des appareils de radioprotection, du suivi dosimétrique et du suivi des formations à la radioprotection dispensées aux personnels du laboratoire.

2

CONTRÔLES EN RADIOPROTECTION

Chaque mois, le SCR réalise une série de contrôles internes de radioprotection. Ce programme de contrôles radiologiques mensuels vise en particulier à vérifier les débits d'équivalents de dose autour des installations et l'état de propreté radiologique (absence de contamination radioactive) dans les salles et laboratoires autorisés. Ainsi, plus de 50 mesures de débits d'équivalent de dose et plus de 30 mesures de contamination sur frottis sont réalisées chaque mois. De plus, les 25 appareils de radioprotection sont vérifiés au moins une fois par an par le SCR. Ces vérifications sont complétées par un examen interne approfondi, tous les six mois, de l'installation AIFIRA au cours duquel 90 points de contrôles sont testés. Ce programme de contrôles internes est doublé par des contrôles externes réalisés par un organisme agréé. Le SCR intervient aussi à la demande des groupes et services pour des mesures ponctuelles et levées de doute. L'ensemble de ces contrôles fait l'objet de rapports écrits dont les conclusions sont présentées au Comité Local d'Hygiène et Sécurité et des Conditions de Travail (CLHSCT).

3

DÉCHETS RADIOACTIFS

Le CENBG s'est engagé depuis 2006 dans une vaste campagne de caractérisation et d'élimination de déchets radioactifs historiques produits avant les années 2000: 12 opérations d'enlèvements de déchets radioactifs ont été réalisées regroupant 25 fûts de 120L de déchets solides et 7 fûts de 30L de déchets liquides. L'ensemble représente un poids total de 925 kg de déchets et une activité de 300 MBq distribuées sur plus de 25 radionucléides pour un coût total de 175 k€. Sur la période 2015-2019, 18 fûts de 120L et 1 fût de 30L de déchets liquides pour un poids total de 325 kg ont été conditionnés et repris (ou programmés pour fin 2019) par l'ANDRA pour un coût de plus de 55 k€.

Une opération de décontamination du bâtiment "Chimie Chaude" a été menée en 2019 avant sa déconstruction prochaine. Elle a conduit à la production de 2,5 t de gravats (béton) contaminés par du ^{14}C et ^{137}Cs , ces déchets sont sur site dans un container avant reprise par l'ANDRA.



4

FORMATION, EXPERTISE

Le SCR dispense des formations en radioprotection auprès des personnels du laboratoire. Elles sont renouvelées tous les trois ans et organisées par groupes et services afin de répondre au mieux aux besoins et enjeux de chacun. Depuis 2015, 21 sessions de formation de 2 à 4 heures ont été réalisées et suivies par 94 agents permanents et non permanents. Les membres du SCR interviennent aussi dans des formations académiques en radioprotection (master 2 Instrumentation nucléaire (20h/an) et projet Erasmus+ IT-ELLI, WPO4 Nuclear and Radiation Safety) mais aussi dans des formations PCR auprès de professionnels et dans des formations courtes auprès d'équipes spécialisées de sapeurs-pompiers du SDIS33.

Les membres du service apportent à la demande conseil et expertise auprès des services de l'Université, des cellules de transfert Arcane et Prisna-Prestations et de sociétés via des actions de consultation. Ils participent également aux réseaux des PCR de l'IN2P3 et à celui des PCR de l'université de Bordeaux. À l'extérieur du laboratoire, le SCR a participé (S. Roudeau, 2016-2019) au bureau de la Commission Locale d'Information Nucléaire (CLIN) de la centrale du Blayais.

AIFIRA

Plateforme de faisceaux d'ions



ABSTRACT

AIFIRA is a small scale ion beam facility equipped with a single stage electrostatic accelerator delivering bright beams of light ions (H^+ , D^+ , He^+) in the MeV energy range. The facility provides ion beam irradiation, analysis and imaging techniques to academic research groups and companies. These techniques cover a wide range of applications including materials research, life sciences, environment, geology and geochemistry, archaeometry and applied physics. In the 2015-2019 period, more than 900 days of beam time have been allocated to internal and external users coming from either local, national or international teams as well as private companies through the activity of the ARCANE technology transfer unit. AIFIRA has integrated the list of research platforms certified by IN2P3 and by the university of Bordeaux. The user teams have published 45 articles involving the AIFIRA facility in international peer-reviewed journals.

RÉSUMÉ

La plateforme AIFIRA (Applications Interdisciplinaires des Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine) repose sur un accélérateur électrostatique simple étage délivrant des faisceaux d'ions légers (H^+ , D^+ , He^+) dans la gamme du MeV. AIFIRA permet de mettre en œuvre des techniques d'irradiation, d'analyse et d'imagerie par faisceau d'ions pour des programmes de recherches académiques et les entreprises. Ces techniques sont utilisées dans une large gamme d'applications: la recherche sur les matériaux, les sciences de la vie, l'environnement, la géologie et la géochimie, l'archéométrie et la physique appliquée. Dans la période 2015-2019, plus de 900 jours de faisceaux ont été fournis aux utilisateurs issus de laboratoires locaux, nationaux ou internationaux ainsi qu'aux entreprises au travers de l'activité de la cellule de transfert de technologies ARCANE. AIFIRA a intégré récemment la liste des plateformes de recherche labellisées par l'IN2P3 et par l'université de Bordeaux. Les équipes utilisatrices ont publié 45 articles impliquant la plateforme dans des revues internationales à comité de lecture.

PERMANENTS

Philippe ALFAURT
Philippe BARBERET
Stéphanie SORIEUL

AIFIRA



INTRODUCTION

AIFIRA

(Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine) est une plateforme interdisciplinaire basée sur un accélérateur d'ions légers et 5 lignes de faisceaux utilisées à des fins de recherche et de prestations. Les thématiques de recherche sont de natures fondamentales

et appliquées. L'offre scientifique de la plateforme s'articule autour de 3 axes :

- l'analyse quantitative multi-élémentaire à des échelles allant du centimètre au micromètre. La combinaison de techniques d'analyse par faisceaux d'ions permet de caractériser des échantillons dans différents domaines: matériaux et couches minces pour l'optique et l'électronique, archéométrie et expertise d'œuvres d'arts, sciences de la vie et études des expositions environnementales sur les organismes à l'échelle cellulaire, échantillons géologiques terrestres et extra-terrestres.
- la micro-irradiation ciblée par particules chargées à l'échelle cellulaire. Cette technique permet de mieux comprendre les mécanismes de la réponse biologique à l'exposition à des rayonnements ionisants tels que ceux présents dans la radioactivité naturelle (particules alpha) et utilisés en radiothérapie (protons).
- la production de champs neutroniques ou de flux gamma parfaitement contrôlés indispensables pour l'étalonnage d'instruments de mesures utilisés en radioprotection, dans le cadre du démantèlement nucléaire, et également pour la recherche fondamentale sur les nouvelles filières nucléaires ou la transmutation des déchets.

La plateforme met à disposition 5 lignes de faisceaux pour ces applications <https://www.ucpa.com/sejour/tfjml024e-rando-lozere-circuit/colos> :

- Un macro-faisceau utilisé pour l'analyse en routine d'échantillons centimétriques
- Un faisceau extrait à l'air spécifiquement dédié à l'analyse de matériaux fragiles ne pouvant être introduits sous vide (bouteilles de vin, échantillons du patrimoine culturel ...)
- Un microfaisceau d'ions permettant une imagerie quantitative à l'échelle du micromètre
- Un microfaisceau dédié à l'irradiation ciblée de cellules vivantes à l'échelle du micromètre pour des études en radiobiologie
- Une ligne de production de champs neutronique ou de flux gamma

Des relations étroites existent avec le monde industriel sous forme de partenariat avec les équipes de recherche utilisatrices (matériaux par exemple) et principalement via la cellule de transfert ARCANE (ADERA) qui réalise des prestations de service en analyse élémentaire pour des PME-PMI ou des grandes entreprises régionales et nationales.

AIFIRA est également un support technique pour la formation professionnelle et l'enseignement puisque l'ensemble des techniques mises en œuvre permettent d'aborder aussi bien des aspects fondamentaux de l'interaction ion-matière, la R&D en instrumentation nucléaire, la métrologie des rayonnements ou encore les techniques et procédures de radioprotection auprès d'installations nucléaires.



1

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

Sur la période 2015-2019, l'activité de la plateforme s'est principalement concentrée autour de la mise en œuvre des techniques d'analyse de matériaux, de la caractérisation de détecteurs et de l'irradiation appliquée à la radiobiologie.

Une des spécificités principales d'AIFIRA est de disposer d'une ligne microfaisceau pour l'imagerie et l'analyse quantitative à l'échelle du micromètre. Cette approche est particulièrement pertinente pour localiser et quantifier des éléments inorganiques dans des échantillons biologiques à l'échelle de la cellule. L'analyse μ -PIXE a notamment été mise en œuvre dans le cadre de projets scientifique visant à déterminer l'impact de l'internalisation de nanoparticules métalliques ou d'oxydes métalliques sur l'homéostasie ionique (GIL15 ; ARM16 ; AUD16 ; CAR16 ; CAR17 ; LAR16 ; SIM17 ; NOV19). Ces projets ont pu mener à des développements techniques et méthodologiques mis à disposition de la communauté par le groupe IRIBio du CENBG (DEV15 ; TRE15 ; MUG18). Les techniques d'analyse à l'échelle cellulaire ont également été utilisées pour une meilleure compréhension du rôle et ou de la toxicité des métaux en neurobiologie (ORT6 ; PER17 ; CAR18) ainsi que pour l'optimisation de bio-matériaux (LAO16 ; LAO17 ; BOS18). Enfin, l'analyse fine d'analogues géochimiques ont conduit à une meilleure description des conditions de formation de la vie primitive sur Terre (WES15 ; WES18 ; HIC19). Au-delà des aspects liés à l'imagerie par microfaisceau, AIFIRA est également l'une des rares installations équipée d'une ligne de faisceau extrait dimensionnée pour l'analyse d'échantillons fragiles et plus particulièrement de matériaux du patrimoine culturel. Une activité régulière, impliquant notamment le laboratoire IRAMAT-CRP2A de l'université Bordeaux-Montaigne (Institut de recherche sur les Archéomatériaux – Centre de recherche en physique appliquée à l'archéologie) est mise en œuvre sur la plateforme dans le but de réaliser des études de provenance d'obsidiennes issue du bassin méditerranéen. Ces études ont mené à plusieurs publications, mettant notamment en valeur les développements méthodologiques associés (BOU15 ; ORA17).

La période 2015-2019 a vu également un développement important des demandes consacrées à la caractérisation de détecteurs de rayonnements ionisants. Ces demandes ont concerné en premier lieu la mise en œuvre de la technique IBIC (Ion Beam Induced Chage) pour la caractérisation précise de détecteurs présentant des volumes sensibles micrométriques. Les possibilités offertes dans ce domaine par les microfaisceaux d'ions ont permis des études approfondies de dosimètres développés pour l'hadronthérapie (ARB17 ; ARB18 ; ZAH18 ; COM19). Les faisceaux parfaitement maîtrisés de la plateforme (protons ou neutrons) ont également été utilisés pour un étalonnage précis de détecteurs développés pour des projets de physique nucléaire (MAR17 ; MAR19 ; DIO18).

Le troisième axe ayant connu un développement significatif dans la période 2015-2019 est l'irradiation ciblée par microfaisceau d'ions à l'échelle cellulaire. Une ligne de faisceau spécifiquement dédiée à cette activité a été développée par l'équipe IRIBio et les services techniques du laboratoire (Instrumentation et Mécanique) et finalisée en 2012 / 2013. Cette ligne a servi de base au démarrage de projets de recherche liés à l'étude des réponses biologiques précoces aux dommages ADN radio induits (MUG17). Une collaboration avec l'installation SNAKE (Universität der Bundeswehr, Munich) a permis, pour la première fois, de mettre en évidence des effets radio-induits suite à l'irradiation ciblée de mitochondries (WAL17). Cette méthode d'irradiation a également pu être appliquée à l'irradiation ciblée de cellules dans un organisme multicellulaire (TOR19).

2

DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX ET ÉVOLUTION DES OUTILS

AIFIRA a connu un certain nombre d'évolutions techniques financées notamment par des projets de la mission interdisciplinaire du CNRS, par un projet physicaner INSERM et par la région Nouvelle Aquitaine. Les principales réalisations concernent :

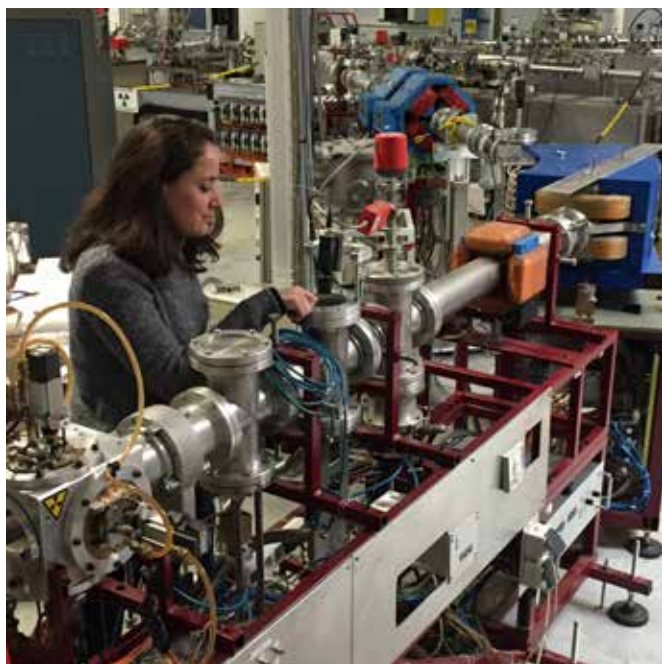
La mise au point de détecteurs ultra-minces en transmission permettant un contrôle précis du nombre de particules délivrées lors des irradiations cellulaires par microfaisceau. Ce travail, mené en collaboration avec le laboratoire capteurs-diamants du CEA-LIST a permis d'équiper la plateforme de ces détecteurs originaux et de réaliser les premières expériences d'irradiation par particules uniques à l'échelle du μ m (BAR17 ; MUG17).

La jouvence de la ligne de production de champs neutroniques. Celle-ci a débuté en 2016 dans le cadre d'un projet plateforme mutualisée de la Région Nouvelle Aquitaine et la finalisation du développement est prévu fin 2019. Le renouvellement de l'instrumentation de cette ligne de faisceau doit permettre à AIFIRA de disposer :

- De champs de référence pour la métrologie neutron
- D'un champ normalisé de rayonnements gamma de 6 MeV en collaboration avec le Laboratoire National Henri Becquerel du CEA Saclay qui est le laboratoire de référence primaire du LNE (Laboratoire National d'Essai) dans l'objectif d'être reconnu comme laboratoire secondaire. La cellule ARCANÉ pourra alors délivrer des certificats d'étalonnage de détecteurs pour l'industrie nucléaire, suivant la norme NF ISO 4037-1 qui fait référence dans ce domaine d'activité.
- D'une ligne de production de neutrons rénovée pour l'ensemble des utilisateurs de faisceaux de neutrons, en particulier le groupe ACEN (Aval du Cycle & Energie Nucléaire).
- D'un accès aux rayonnements neutron et gamma normalisés pour la mise en situation et les activités tuteurées sur la plateforme dans le cadre de formations professionnelles en radioprotection (initiale et continue).

Une mise à jour, à partir de 2020 des outils d'analyses appliqués à l'archéométrie et à l'expertise des objets du patrimoine culturel. La plateforme vient de recevoir un soutien de la Région Nouvelle Aquitaine pour équiper la ligne faisceau extrait de détecteurs de spectrométrie X de dernière génération (Silicon Drift Detectors). Cette évolution doit permettre de diminuer le temps de mesure et ce projet sera l'occasion de réaliser une jouvence des équipements de la ligne dans le but d'améliorer la fiabilité des mesures et de pérenniser cette activité. Ce projet est complété par une mise à jour du microfaisceau (système de balayage, alimentation de courant pour la focalisation) financé par le projet Physicaner DIADÉM (2018-2020).

L'ensemble de ces développements bénéficie du support des services techniques du CENBG et plus particulièrement d'une implication régulière du service instrumentation.



Dans la période 2015-2017, l'accès à la plateforme a été organisé via un appel à projets formel bi-annuel et une expertise des projets par un PAC (Programme Advisory Committee). Le comité, composé, entre autres, de cinq experts extérieurs a été présidé au cours des 7 premières années d'exploitation (2006-2015) par le Dr G. Grime (Université de Surrey, UK). Suite au développement et au transfert par les équipes du CENBG d'une ligne d'irradiation par microfaisceau d'ions pour la plateforme AMANDE de l'IRSN (laboratoire de métrologie des neutrons - LMDN), un nouveau PAC commun aux deux plateformes a été mis en place en 2015.

Ce fonctionnement a été modifié fin 2018 suite aux processus de labellisation des plateformes par l'IN2P3 puis l'université de Bordeaux. La plateforme a été réorganisée autour d'une équipe opérationnelle (composée de 2 ITA et un enseignant-chercheur) et d'un comité d'expertise regroupant des spécialistes des différents techniques d'irradiation et d'analyse. Ce comité se réunit environ une fois par mois pour expertiser les demandes et d'interagir avec les utilisateurs sur la faisabilité des expériences, suivre le déroulement des expériences et proposer des évolutions techniques. Cette organisation est complétée par un comité des utilisateurs se réunissant une fois par an. Ce dernier permet à la plateforme de bénéficier du retour d'expérience des utilisateurs. Enfin l'activité de la plateforme est discutée une fois par an avec les tutelles du CENBG dans le cadre d'un comité de pilotage réunissant des représentants des tutelles, la direction du CENBG et l'équipe opérationnelle de la plateforme.

- [ARB17] N. Arbor et al., "Real-time detection of fast and thermal neutrons in radiotherapy with CMOS sensors," *Phys. Med. Biol.*, vol. 62, no. 5, pp. 1920–1934, 2017.
- [ARB18] N. Arbor et al., "Micro-scale characterization of a CMOS-based neutron detector for in-phantom measurements in radiation therapy," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 888, no. September 2017, pp. 103–109, 2018.
- [ARM16] L. Armand et al., "Long-term exposure of A549 cells to titanium dioxide nanoparticles induces DNA damage and sensitizes cells towards genotoxic agents," *Nanotoxicology*, vol. 10, no. 7, pp. 913–923, 2016.
- [AUD16] C. Aude-Garcia et al., "Different in vitro exposure regimens of murine primary macrophages to silver nanoparticles induce different fates of nanoparticles and different toxicological and functional consequences," *Nanotoxicology*, vol. 10, no. 5, pp. 586–596, 2016.
- [BAR15] P. Barberet et al., "Advances in microbeam technologies and applications to radiation biology," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 166, no. 1–4, pp. 182–187, 2015.
- [BAR17] P. Barberet et al., "Cell micro-irradiation with MeV protons counted by an ultra-thin diamond membrane," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, no. 24, p. 243701, 2017.
- [BAR19] M. Barberio et al., "Pigment darkening as case study of In-Air Plasma-Induced Luminescence," *Sci. Adv.*, vol. 5, no. 6, pp. 1–9, 2019.
- [BOS18] C. Bossard et al., "Polycaprolactone/bioactive glass hybrid scaffolds for bone regeneration," *Biomed. Glas.*, vol. 4, no. 1, pp. 108–122, 2018.
- [BOU15] F. X. Le Bourdonnec et al., "Obsidians from the Kerkennah Islands (eastern Tunisia) and the PIXE elemental compositions of the Mediterranean peralkaline obsidians," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 358, pp. 271–275, 2015.
- [CAR16] A. Carmona et al., "Particle Induced X-ray Emission Imaging of Gadolinium Distribution into Xenograft U87 Human Glioblastoma after AGuX Nanoparticles Injection," *Microsc. Microanal.*, vol. 22, no. S3, pp. 1094–1095, 2016.
- [CAR17] A. Carmona et al., "Heterogeneous intratumoral distribution of gadolinium nanoparticles within U87 human glioblastoma xenografts unveiled by micro-PIXE imaging," *Anal. Biochem.*, vol. 523, pp. 50–57, 2017.

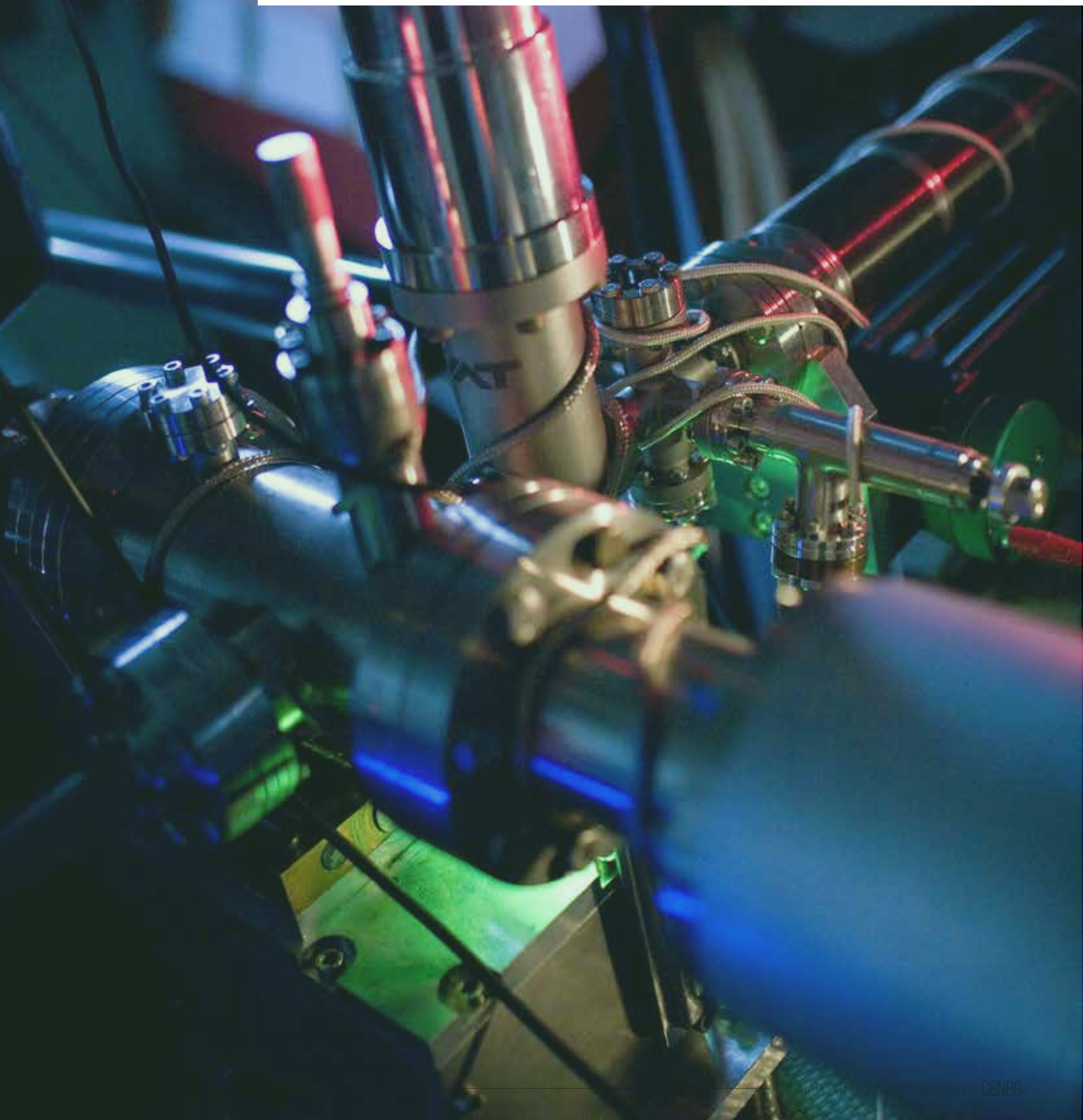




- [CAR18] A. Carmona et al., "Uranium exposure of human dopaminergic cells results in low cytotoxicity, accumulation within sub-cytoplasmic regions, and downregulation of MAO-B," *Neurotoxicology*, vol. 68, no. May, pp. 177–188, 2018.
- [COM19] R. Combe et al., "Experimental characterization of a fast, pixelated CMOS sensor and design of a Recoil-Proton Telescope for neutron spectrometry," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 929, no. March, pp. 121–128, 2019.
- [COT15] S. Cotte et al., "Lithium-rich manganese oxide spinel thin films as 3 V electrode for lithium batteries," *Electrochim. Acta*, vol. 180, pp. 528–534, 2015.
- [COT18] S. Cotte et al., "Iron molybdate thin films prepared by sputtering and their electrochemical behavior in Li batteries," *J. Alloys Compd.*, vol. 735, pp. 1454–1462, 2018.
- [CRA15] F. Le Cras et al., "All-Solid-State Lithium-Ion Microbatteries Using Silicon Nanofilm Anodes: High Performance and Memory Effect," *Adv. Energy Mater.*, vol. 5, no. 19, pp. 1–10, 2015.
- [DEV15] G. Devès et al., "An ImageJ plugin for ion beam imaging and data processing at AIFRA facility," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 348, pp. 62–67, 2015.
- [DIO18] L. Dioni et al., "Tests of a solution-grown stilbene scintillator in mono-energetic neutron beams of 565 keV and 5 MeV," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 880, no. June 2017, pp. 210–215, 2018.
- [DUB17] V. Dubois et al., "Dual cation-and anion-based redox process in lithium titanium oxysulfide thin film cathodes for all-solid-state lithium-ion batteries," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 3, pp. 2375–2384, 2017.
- [GIL15] S. Gil et al., "Analysis of Platinum and Trace Metals in Treated Glioma Rat Cells by X-Ray Fluorescence Emission," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 163, no. 1–2, pp. 177–183, 2015.
- [HIC19] K. Hickman-Lewis et al., "Mechanistic Morphogenesis of Organo-Sedimentary Structures Growing Under Geochemically Stressed Conditions: Keystone to Proving the Biogenicity of Some Archaean Stromatolites?," *Geosciences*, 9, pp. 359, 2019.
- [INC15] S. Incerti et al., "Comparison of experimental proton-induced fluorescence spectra for a selection of thin high-Z samples with Geant4 Monte Carlo simulations," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 358, pp. 210–222, 2015.
- [LAO16] J. Lao et al., "Bioactive glass-gelatin hybrids: Building scaffolds with enhanced calcium incorporation and controlled porosity for bone regeneration," *J. Mater. Chem. B*, vol. 4, no. 14, pp. 2486–2497, 2016.
- [LAO17] J. Lao et al., "Bioactive glass coating on gelatin scaffolds at ambient temperature: easy route to make polymer scaffolds become bioactive," *J. Mater. Sci.*, vol. 52, no. 15, pp. 9129–9139, 2017.
- [LAR16] C. Larue et al., "Innovative combination of spectroscopic techniques to reveal nanoparticle fate in a crop plant," *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.*, vol. 119, pp. 17–24, 2016.
- [MAR17] P. Marini et al., "Development of a gaseous recoil-proton detector for neutron flux measurements between 0.2 and 2 MeV neutron energy," *EPJ Web Conf.*, vol. 146, 2017.
- [MAR17] P. Marini et al., "Systematic investigation of background sources in neutron flux measurements with a proton-recoil silicon detector," *NIM A* 841, pp. 567–64, 2017.
- [MAR19] P. Marini et al., "Development of a gaseous proton-recoil telescope for neutron flux measurements between 0.2 and 2 MeV neutron energy," *Radiat. Meas.*, vol. 124, no. March 2018, pp. 9–12, 2019.
- [MIC15] C. Michelet et al., "Quantitative reconstruction of PIXE-tomography data for thin samples using GUPIX X-ray emission yields," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 348, pp. 92–99, 2015.
- [MUG17] G. Muggiolu et al., "Single α -particle irradiation permits real-time visualization of RNF8 accumulation at DNA damaged sites," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. January, p. 41764, 2017.
- [MUG18] G. Muggiolu et al., "jove-protocol-55041-in-situ-detection-single-cell-quantification-metal-oxide.pdf," *Journal of Vis. Exp.*, no. 132, p. e55041, 2018.
- [NOV19] S. Novak et al., "The In vivo effects of silver nanoparticles on terrestrial isopods, Porcellio scaber, depend on a dynamic interplay between shape, size and nanoparticle dissolution properties," *Analyst*, vol. 144, no. 2, pp. 488–497, 2019.
- [ORA17] M. Orange et al., "On sourcing obsidian assemblages from the Mediterranean area: analytical strategies for their exhaustive geochemical characterisation," *J. Archaeol. Sci. Reports*, vol. 12, pp. 834–844, 2017.
- [ORT16] R. Ortega et al., " α -Synuclein Over-Expression Induces Increased Iron Accumulation and Redistribution in Iron-Exposed Neurons," *Mol. Neurobiol.*, vol. 53, no. 3, pp. 1925–1934, 2016.
- [PER17] L. Perrin et al., "Zinc and Copper Effects on Stability of Tubulin and Actin Networks in Dendrites and Spines of Hippocampal Neurons," *ACS Chem. Neurosci.*, vol. 8, no. 7, pp. 1490–1499, 2017.
- [PIT18] A. Pitarch Martí et al., "Seeking black. Geochemical characterization by PIXE of Palaeolithic manganese-rich lumps and their potential sources," *J. Anthropol. Archaeol.*, vol. 50, no. March, pp. 54–68, 2018.
- [ROU15] S. Roudeau et al., "Reduced net charge and heterogeneity of pl isoforms in familial amyotrophic lateral sclerosis mutants of copper/zinc superoxide dismutase," *Electrophoresis*, vol. 36, no. 19, pp. 2482–2488, 2015.
- [SIM17] M. Simon et al., "In Situ Quantification Of Diverse Titanium Dioxide Nanoparticles Unveils Selective Endoplasmic Reticulum Stress-Dependent," *Nanotoxicology*, vol. 11, no. January, pp. 134–145, 2017.
- [TOR19] E. Torfeh et al., "Monte-Carlo dosimetry and real-time imaging of targeted irradiation consequences in 2-cell stage *Caenorhabditis elegans* embryo," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 10568, 2019.
- [TRE15] Q. Le Trequesser et al., "Multimodal correlative microscopy for in situ detection and quantification of chemical elements in biological specimens. Applications to nanotoxicology," *J. Chem. Biol.*, vol. 8, no. 4, pp. 159–167, 2015.
- [WAL17] D. W. M. Walsh et al., "Live cell imaging of mitochondria following targeted irradiation in situ reveals rapid and highly localized loss of membrane potential," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. October 2016, p. 46684, 2017.
- [WES15] F. Westall et al., "Archean (3.33 Ga) microbe-sediment systems were diverse and flourished in a hydrothermal context," *Geology*, vol. 43, no. 7, pp. 615–618, 2015.
- [WES18] F. Westall et al., "A Hydrothermal-Sedimentary Context for the Origin of Life," *Astrobiology*, vol. 18, no. 3, pp. 259–293, 2018.
- [ZAH18] I. A. Zahradnik et al., "scCVD Diamond Membrane based Microdosimeter for Hadron Therapy," *Phys. Status Solidi*, vol. 1800383, pp. 1–10, 2018.

PIAGARA

Plateforme Interdisciplinaire
pour l'Analyse des GAZ RAres



RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Eric GILABERT

RESPONSABLE TECHNIQUE

Rémi FAURE

INTERVENANTS

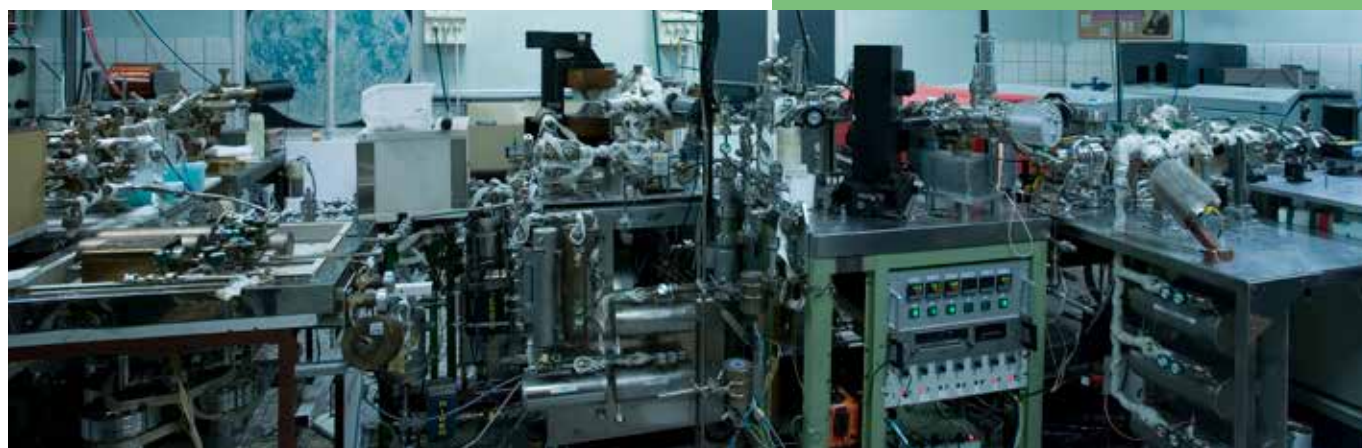
Denis HORLAIT
Bernard LAVIELLE
Bertrand THOMAS
Services techniques

ABSTRACT

PIAGARA, is a platform dedicated to the analysis of noble gases down to trace level in a large variety of samples. The expertise ranges from materials of interest for the nuclear power industry (fuels, absorbers, structures) as well as for the monitoring of human nuclear activity in a controlled (power plants) or non-controlled (proliferation) environment. It is also available for studies in Geoscience (underground water, ice datation, clays, samples of the lithosphere or of extraterrestrial matter). Recently the platform has been equipped with a new laser heating system (Chapter 1) used mainly for nuclear materials. Chapters 2 and 3 describe typical studies requested to the platform which are not in our main domains (see RADEN section) but which allow starting collaborations.

RÉSUMÉ

PIAGARA est une plateforme dédiée à l'analyse des gaz rares jusqu'à à l'état de traces dans des échantillons très variés. L'expertise va des matériaux d'intérêt pour l'industrie électronucléaire (combustibles, absorbants, structures) ainsi que pour le suivi de l'activité nucléaire humaine dans un cadre contrôlé (centrales) ou non (prolifération). Elle est aussi disponible pour des études en géoscience (circulation d'eaux souterraines, datations de glaces ou de nappes phréatiques, argiles, échantillons de la lithosphère ou de la matière extraterrestres). Récemment la plateforme s'est équipée d'un nouveau système de chauffage par laser (chapitre 1) utilisé essentiellement pour les matériaux du nucléaire (voir partie RADEN). Les chapitres 2 et 3 décrivent des études typiques demandées à la plateforme qui ne sont pas dans nos thématiques principales (décrites dans le chapitre RADEN), mais qui permettent d'amorcer des collaborations.



INTRODUCTION

PIAGARA (Plateforme Interdisciplinaire pour l'Analyse des Gaz Rares est une plateforme analytique dédiée à l'analyse élémentaire et isotopique des gaz rares avec une grande précision. Elle comprend un parc de 5 spectromètres de masse et différentes lignes d'extraction des gaz permettant d'aborder des domaines très variés comme l'étude des matériaux liés notamment au nucléaire, la géochimie (terrestre et extraterrestre), la paléoclimatologie ou l'hydrogéologie (eaux souterraines).

PIAGARA est identifiée au sein des plateformes analytiques de l'Université de Bordeaux ainsi que dans le Réseau Géochimique et Expérimental Français (RéGEF).

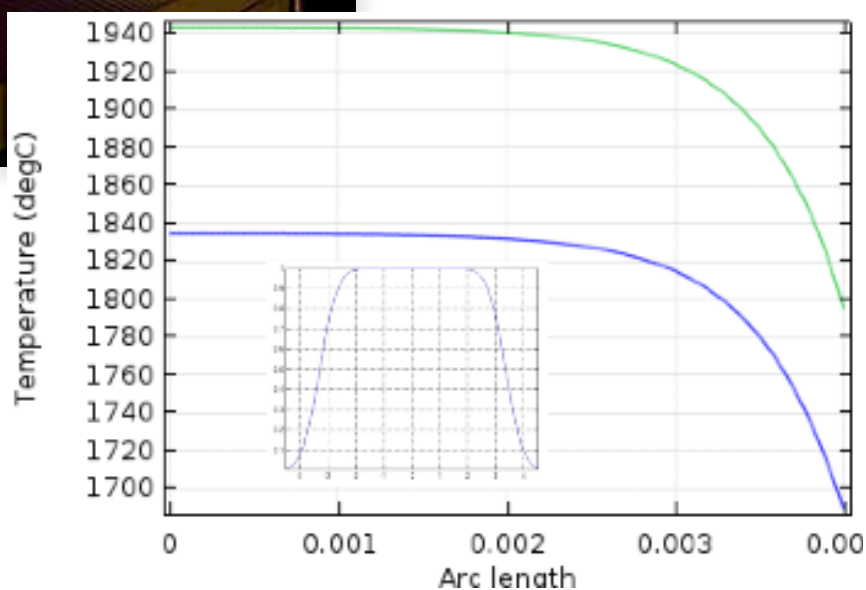
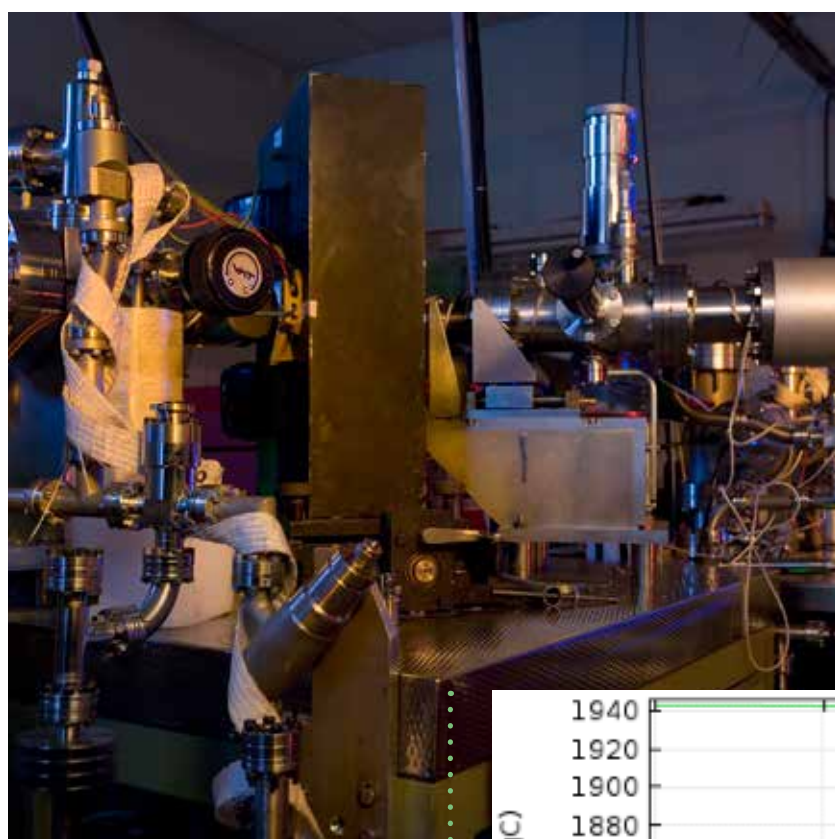


FIGURE 1

Répartition de la température sur UO₂ ayant absorbé 100W par un faisceau laser ayant une géométrie "Top Hat". Les courbes sont pour la face supérieure éclairée (vert) et inférieures (bleu). En encart, géométrie "Top Hat" après le passage dans un diffuseur d'un faisceau gaussien

Ce projet avait pour objectif de construire un nouveau système de chauffage des échantillons. Nous avons le choix entre un système classique avec un élément chauffant placé à l'extérieur du système couplé à une mesure de température par thermocouple ou un chauffage laser et une mesure par pyrométrie. Nous avons choisi la seconde option, dont le principal inconvénient était la complexité de la mise en œuvre, compensée par les nombreux avantages qu'offrait ce nouveau système :

- Pouvoir travailler en environnement "froid", le chauffage étant dirigé sur l'échantillon seul, ce qui limite grandement les effets de l'environnement.
- Pouvoir atteindre si besoin des températures de plus de 2000°C, avec pour objectif une répartition la plus homogène possible au sein de l'échantillon.
- Avoir la possibilité de positionner plusieurs échantillons dans une chambre de façon à éviter de remettre à l'air trop souvent, car pénalisant en temps pour nos analyses.
- Pouvoir utiliser ce système de chauffage dans d'autres zones expérimentales en particulier pour fondre des échantillons naturels tels que des météorites ou des cibles irradiées (le faisceau laser de chauffe étant amené par une fibre optique souple).

Étude thermique

Le choix du système de chauffage s'est porté rapidement sur un laser à diode, par économie. Il a fallu déterminer la puissance nécessaire par rapport à nos échantillons actuels et probables sur les quelques années à venir. Des études thermiques en collaboration avec le bureau d'étude ont été essentielles pour définir une géométrie de la chambre et une implantation des éléments optiques. La difficulté majeure est l'homogénéité en température de l'échantillon. Le profil de puissance gaussien du faisceau laser (de son centre vers ses bords) ainsi que le refroidissement naturel par radiation empêchent d'obtenir une température homogène sur toute la surface. Pour pallier à cet inconvénient, un "diffuseur" est introduit dans le faisceau. Le diffuseur permet au faisceau laser de passer d'une géométrie gaussienne à une géométrie "Top Hat", donc homogène. Les calculs thermiques de la Figure 1 montrent que la température est homogène sur les 56% de la surface de l'échantillon (75% du rayon). Nous nous sommes donc procuré un diffuseur de la société Hoorlor qui permet d'avoir un profil d'éclairement beaucoup plus large (encart de la Figure 1). Pour conserver une homogénéité, il faut conserver une zone centrale de 3mm de rayon. Dans ce calcul, la différence de température entre le centre et $r=3\text{mm}$ n'excède pas 20°C (pour $T \approx 1940^\circ\text{C}$). Ainsi, nous avons défini que pour les futurs échantillons d' UO_2 implantés en gaz rares, une plaque percée d'un trou de 6mm de diamètre sera systématiquement placée au-dessus de la cible d' UO_2 de façon à ne réaliser l'implantation que dans la zone centrale (homogène en T). Cette plaque aura une deuxième utilité, elle servira d'étalon d'irradiation pour les implantations. En effet, cette plaque (ou une partie) en Al ou inox pourra par la suite être complètement fondue grâce au système laser. Les ions implantés seront analysés et nous pourrons ainsi avoir une mesure précise de la dose réelle implantée.

La deuxième étude préliminaire concernait le support des échantillons dans la chambre. Un des objectifs était de proposer un environnement "froid" de façon à ce qu'il n'influe pas sur le relâchement (notamment sur la pression partielle en O_2 dans le cas des travaux sur UO_2). Pour cela, les échantillons d' UO_2 seront positionnés sur 3 pointes en W qui maintiendront l'échantillon en pseudo lévitation. La Figure 2 est le résultat

de calculs thermiques avec un support de W qui montre que cet effet est limité à la zone de la pointe. Le cache placé sur la partie externe de la cible masquera cet effet. Pour plus de stabilité, un support constitué de deux fils de tantale se croisant sous l'échantillon et l'encadrant sur les bords a aussi été créé et donne des performances thermiques quasi-équivalentes.

Le dernier calcul concerne l'environnement de la cible chauffée et la possibilité de positionner plusieurs échantillons (Figure 3). Une cible d' UO_2 à 2000°C va rayonner sur l'environnement en particulier sur le support des tiges en W ou fils en Ta (2cm plus bas), sur un échantillon voisin (~7cm) et sur la paroi de la chambre refroidie (diamètre intérieur=10cm). Les calculs montrent que les températures restent suffisamment basses pour ne pas induire d'effets d'environnement du support ($T < 150^\circ\text{C}$) et de dégazage sur les autres échantillons ($T < 60^\circ\text{C}$).

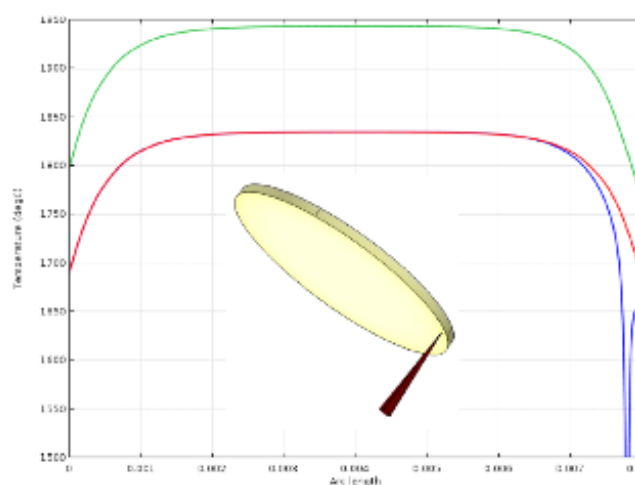


FIGURE 2

Effet d'une pointe de W sur la répartition en T° . En rouge, répartition selon un diamètre de la partie non éclairée qui ne passe pas par la pointe. En bleu, variation de la température selon un diamètre qui passe par la pointe (face non éclairée). En vert, température selon un diamètre qui passe par la pointe, mais sur la face éclairée. En encart, vue 3D de la cible et d'un support en W.

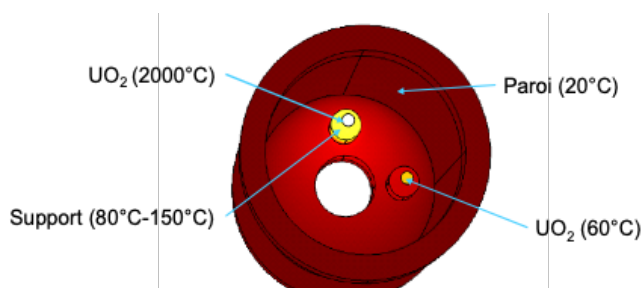


FIGURE 3

Calcul thermique de l'environnement de la cible.

Choix et implantation des différents éléments

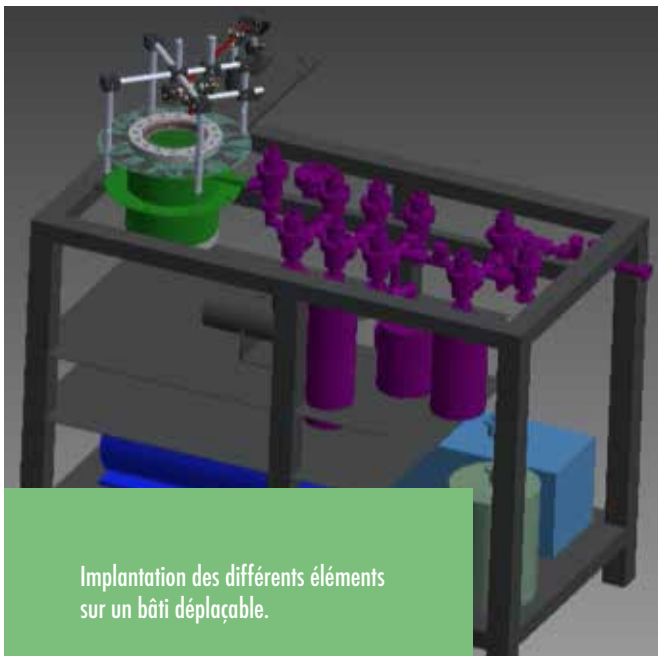
Le choix du laser s'est porté sur le modèle LuOcean M2 de Lumics offrant une réserve de puissance conséquente (650 W continu) et à des longueurs d'onde dans le proche infrarouge (940 nm multimode ± 10 nm). Il est refroidi par eau et contrôlé par une alimentation électrique continue de 3500 W. En sortie de laser, une fibre optique permet d'amener le faisceau dans différents endroits du laboratoire. En sortie de fibre, une lentille permet de collimater le faisceau. Il peut être dirigé et focalisé vers une première chambre de fusion qui permet de faire fondre des échantillons de façon à récupérer l'ensemble des gaz rares présents. Cette chambre est essentiellement destinée aux caches en Al ou inox, positionnés sur les cibles d' UO_2 qui nous permettront de déterminer les doses et l'homogénéité de l'irradiation. En situation de recuit, le faisceau traverse un diffuseur pour avoir une géométrie "Top Hat" et il éclaire un des échantillons situés au fond de la chambre. Pour le contrôle de température, nous disposons de 3 pyromètres ayant chacun leurs avantages respectifs:

- Sensortherm M308: $\lambda = 865\text{-}905$ nm ; $T_{\text{mesurée}}: 600\text{-}400^\circ\text{C}$. Sa faible longueur d'onde d'analyse permet de réduire les incertitudes de mesure liées à l'émissivité ϵ du matériau d'étude, paramètre parfois mal référencé. Pour UO_2 , ϵ est connue pour être stable en fonction de T à cette température ce qui en fait un outil de choix pour ce matériau.
- Sensortherm M322: $\lambda_1 = 1,65\text{-}1,8$ μm ; $\lambda_2 = 1,45\text{-}1,65$ μm ; $T_{\text{mesurée}}: 600\text{-}2200^\circ\text{C}$. Pyromètre bi-chromatique, il permet des mesures basées non plus sur ϵ mais sur le rapport entre les luminances mesurées à ses 2 longueurs d'ondes d'analyse et en considérant ici un rapport ϵ_2/ϵ_1 qui peut être déterminé en fonction de T par calibration avec un autre pyromètre. Il nous a été particulièrement utile pour les travaux sur le B4C.

- Raytek: $\lambda = 1,65$ μm ; $T_{\text{mesurée}}: 450\text{-}1600^\circ\text{C}$. Sa plus grande sensibilité permet des mesures à plus faible température.
- Le (ou les) pyromètre choisi vise la zone éclairée de l'échantillon. Les pyromètres ainsi que l'alimentation électrique du laser sont connectés à un automate (Siemens) qui régule ainsi la température de la cible, mais aussi contrôle le bon fonctionnement de l'expérience grâce à différents capteurs du système (thermocouples, pyromètres, jauge de pression, caméra). L'ensemble des données et le pilotage des expérimentations est rassemblé au sein d'un programme écrit en Labview.

Le montage de ce four laser a été réalisé sur un bâti déplaçable, ce qui a permis de le développer en parallèle sans arrêter les autres expériences et qui permettra de le positionner différemment dans le laboratoire en fonction des aménagements prévus à moyen terme (projet CREATIF 2021). Sur ce bâti (Figure 4), une ligne ultravide a été adjointe (groupe de purification chimique, volumes de fractionnement & prélèvement, groupes de pompage ionique et turbomoléculaire) de façon à avoir un système autonome, dédié aux matériaux nucléaires et pouvant, si besoin, être facilement décontaminable.

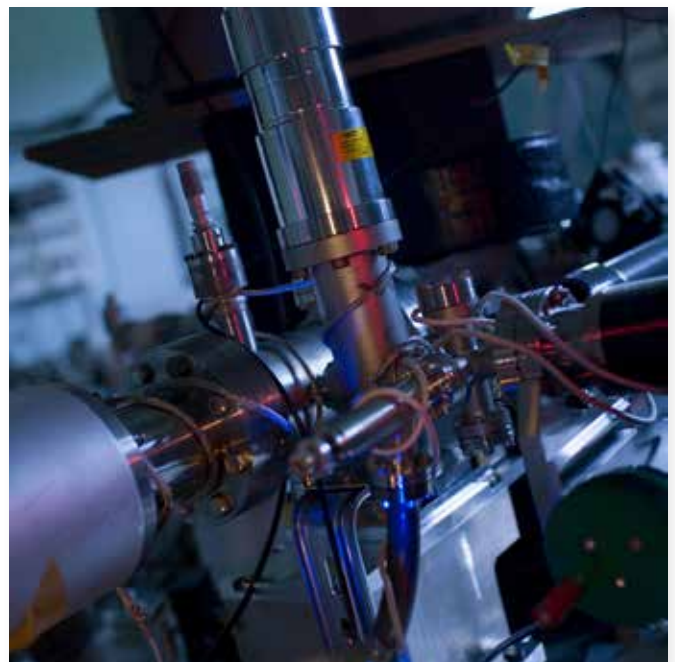
Ce montage a été principalement financé par la bourse de 110 k€ "Chaire d'Installation" de l'IDEX de Bordeaux, obtenue par D. Horlait en 2016. Le budget a été complété par la contribution de l'IN2P3 (via le soutien au Master Projet IrrMaNu) et par un contrat d'accompagnement par le CEA-Cadarache. Le dispositif expérimental est partiellement décrit dans la publication ^[HORL19].



Implantation des différents éléments sur un bâti déplaçable.

Clayette basse: pompes ultra-vide.

Éléments violets: dispositifs de traitements des gaz et raccord du bâti vers spectromètres de masse. En vert et gris, chambre échantillon et éléments optiques.



2

TRANSFERT SOUTERRAIN
DE L'HE ET DU KR (2017)

Le laboratoire ENSEGD/Université de Bordeaux a eu un besoin ponctuel des capacités d'analyse en gaz rares du laboratoire. Ce travail concerne l'enfouissement souterrain du CO₂ et la possibilité de contrôler des fuites éventuelles en suivant la diffusion de l'He et du Kr mélangé au CO₂. Des études ont montré [RHIN 16] que l'He et le Kr pouvaient être des traceurs de fuite et être détectés précocement.

Une expérience d'injection de CO₂ peu profonde a été réalisée sur un site pilote à St-Emilion. Un mélange de CO₂, d'He et de Kr a été injecté à faible taux proche de la surface. Une zone de collecte automatisée située plus profondément permet de récupérer les gaz à différentes positions et à différents moments. Un problème technique de leur préleveur-analyseur les a empêchés d'analyser les gaz d'une série d'injection et ils se sont tournés vers nous pour procéder à l'étude de leurs échantillons. La Figure 5 montre les résultats obtenus. Il s'agit de 8 prélèvements effectués entre 2 et 13 jours à 45 cm de l'injection. L'enrichissement par rapport à l'air mesuré pour l'He montre clairement le passage du flux d'He avec un maximum à 4-5 jours. Pour le Kr, la diffusion est plus lente et le maximum est atteint aux alentours du 10 - 12^{ème} jour. Les courbes sont des calculs macroscopiques basés sur les lois de Fick qui permettent de déterminer des coefficients de diffusion apparents et des vitesses d'advection.

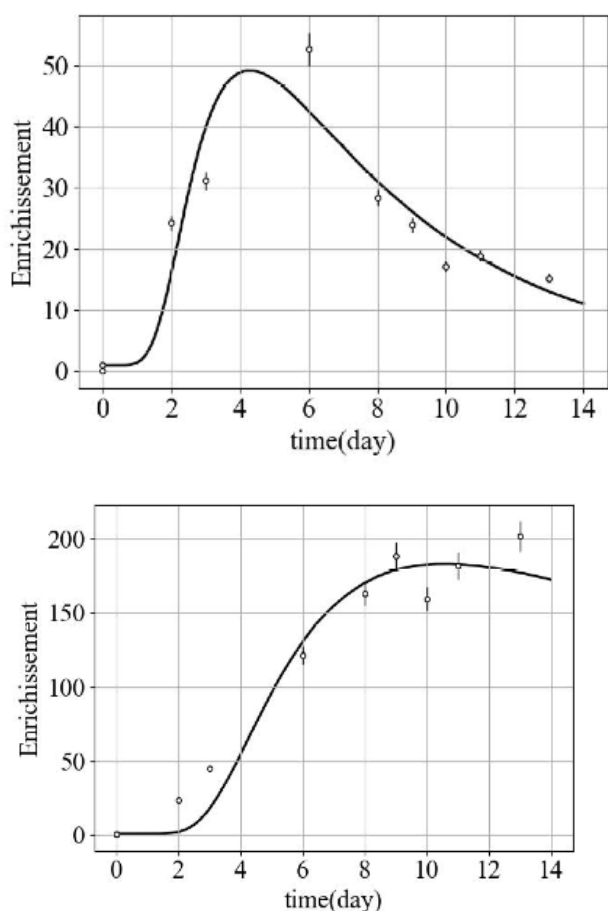


FIGURE 4

Enrichissement par rapport à l'air d'hélium (HAUT) et de Kr (bas) mesurés dans des tubes prélevés entre 2 et 13 jours sur le site de St-Emilion. Les courbes sont des calculs de diffusion avec ajout d'une vitesse d'advection pour l'hélium de 5 cm/jour. Les coefficients de diffusion apparents calculés pour l'He et le Kr sont de $9.8.10^{-3}$ et de $3.36.10^{-3}$ m²/jour.

3

EFFETS DE L'IRRADIATION SUR LES
MINÉRAUX ARGILEUX (2015)

Le laboratoire IC2MP/Université de Poitiers a eu besoin de mesures ponctuelles de gaz rares pour compléter un travail. Des échantillons de smectite ont été irradiés par des He de 216 keV à des fluences de $7.6.10^4$ He/cm² et 3.10^5 He/cm². Les profils de relâchements sont faits à 2 températures: 350°C et 1000°C. À 1000°C, on estime que l'hélium est entièrement dégazé de l'échantillon. Deux échantillons sortent du lot avec des relâchements de 1.5% et 6% (courbes rouge et bleue de la Figure 6). Pour les 3 autres, le relâchement est de $\sim 1.5.10^{-3}$. Entre l'irradiation et la mesure, la presque totalité de l'hélium a diffusé. Les résultats montrent des différences que l'on a attribuées dans un premier temps à des pertes durant le stockage et non liées à la fluence d'irradiation.

Pour mettre en évidence les pertes au cours du stockage, une dernière manip consistait à mesurer l'hélium relâché à température ambiante. Pour cela, on a stocké 2 gros échantillons d'argiles (2,8989 cm²) pendant une semaine. La quantité mesurée correspond à $\sim 10^{-5}$ de la dose implantée et à $\sim 1\%$ de la quantité qui est normalement encore présente dans l'échantillon. On ne voit donc que très peu de diffusion à 20°C, car l'He qui reste est piégé fortement (il faut des températures $>350^\circ\text{C}$ pour le dépiéger). Un scénario plausible est que l'on ait 2 populations d'He piégées dans des endroits différents. La première population la plus abondante (95-99%) est très volatile et elle diffuse très rapidement (feuillelet ?). La deuxième va être piégée dans des zones où il faut des températures supérieures à 350°C pour les libérer (cavité octaédrique).

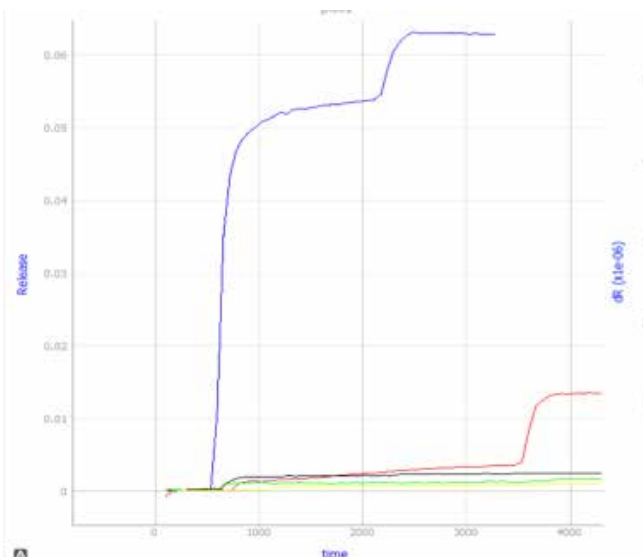


FIGURE 5

Relâchement de ⁴He dans 5 échantillons de smectite.



PRISNA

Plateforme Régionale
Interdisciplinaire de Spectrométrie
Nucléaire en Aquitaine

ABSTRACT

PRISNA is a multipurpose platform for radionuclides traces metrology. It combines capabilities in gamma spectrometry and in radon emanation measurements. It is one of the rare platform in France able to measure very low levels of radioactivity of samples by gamma spectrometry, down to few 0.0001 Bq/kg on site in Bordeaux, and down to few 10^{-4} Bq/kg at the Modane underground laboratory (LSM). In addition to the low-background High Purity Germanium (HPGe) detectors, it hosts a very large Radon emanation chamber, able to perform the ^{222}Rn metrology down to a few tens of atoms per day and per square meter.

RÉSUMÉ

PRISNA est une plateforme polyvalente pour la métrologie radionucléides à l'état de traces. Elle combine des capacités en spectrométrie gamma ainsi qu'en mesure d'émanation du radon. C'est l'une des rares plateformes en France capable de mesurer de très faibles niveaux de radioactivité par spectrométrie gamma, jusqu'à quelques 0,01 Bq/kg sur site à Bordeaux, et jusqu'à down to few 10^{-4} Bq/kg au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM). En plus des détecteurs germaniums haute pureté à faible bruit de fond (HPGe), elle héberge une très grande chambre d'émanation de radon, capable de réaliser la métrologie du ^{222}Rn jusqu'à quelques dizaines d'atomes par jour et par mètre carré.

RESPONSABLE SCIENTIFIQUE

Cédric CERNA

RESPONSABLE TECHNIQUE

Sébastien LEBLANC

INTERVENANTS

Hubert CHIRON

Philippe HUBERT

Christine MARQUET

Frédéric PERROT

Michael PRAVIKOFF

Benjamin SOULE

Bertrand THOMAS



INTRODUCTION

PRISNA

(Plateforme Régionale Interdisciplinaire de Spectroscopie Nucléaire en Aquitaine) est une plateforme de métrologie des radio-isotopes en ultra-tracé implantée au CENBG inaugurée en 2009. Le bâtiment PRISNA a été financé dans le cadre d'un COP (Contrat d'Objectifs Partagés) par la Région Aquitaine et le CNRS, mais également par l'Université Bordeaux et le CENBG. Cette plateforme est née d'une collaboration interdisciplinaire entre des laboratoires de recherche bordelais travaillant sur les mesures de spectrométrie gamma bas bruit de fond dans différentes disciplines: physique du neutrino, océanographie, archéométrie, datation et recherche de fraudes, environnement. Elle héberge plusieurs détecteurs Germanium appartenant à deux laboratoires de l'Université de Bordeaux (le CENBG, EPOC1 et un laboratoire de l'Université de Bordeaux Montaigne-CRP2A). Elle héberge depuis 2012 un équipement de mesure d'émanation du Radon d'une capacité quasiment unique au monde (700 litres).

Outre des mesures menées dans le cadre de la recherche propre à chaque discipline, les équipes de recherche du CENBG ont également développé des activités de recherche appliquée. On pourra citer l'étude récente conduite en 2019 sur la fixation des descendants du radon (^{222}Rn) dans les vêtements pour EDF.

Par ailleurs, un vecteur spécifique de valorisation appelé PRISNA-Prestation, géré par l'ADERA, opère des mesures de prestation de service à destination des entreprises et collectivités.

La plateforme PRISNA héberge plusieurs spectromètres gammas Germanium et une plateforme spécifique de mesure Radon. Nous opérons aussi, "hors les murs", deux détecteurs Germanium situés en environnement très profond au Laboratoire Souterrain de Modane.

Cette capacité à opérer des mesures sur des appareillages spécifiques placés dans un environnement adéquat est pratiquement unique en France. Nous continuons à essayer de développer cette projection "PRISNA hors les murs" chaque fois que cela est nécessaire pour rester à la pointe de la métrologie de radio-isotopes en ultra-traces.

Enfin, une prospective scientifique et technique est en cours, pour évaluer le devenir et les compétences à développer autour de la plateforme. Des investigations ont notamment été conduites autour de la technique de spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif associée à une ablation laser (LA-ICPMS) pour déterminer la contamination ^{238}U et ^{232}Th en surface et en volume d'échantillons à des niveaux inférieurs à 10^{-12} g/g.

PRISNA FAIT PARTIE DU RÉSEAU BECQUEREL, CRÉÉ EN 2010, QUI FÉDÈRE LES PLATEFORMES DE MESURES DE RADIOACTIVITÉ DU CNRS-IN2P3 EN FRANCE.

Vue panoramique de la salle de mesure dans le bâtiment PRISNA



1

MESURES PAR SPECTROMÉTRIE GAMMA

La plateforme PRISNA héberge 5 spectromètres gammas Germanium:

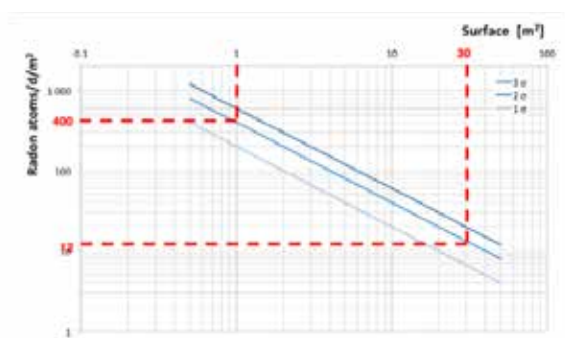
- 1 détecteur Germanium de type coaxial de 100 cm³
- 2 détecteurs Germanium de type puits de 300 cm³
- 1 détecteur Germanium planaire de 150 cm³ utilisé spécifiquement par le CRP2A
- 1 détecteur Germanium planaire de 150 cm³ utilisé spécifiquement par PRISNA-Prestation

PRISNA est l'une des rares plateformes en France à pouvoir mesurer des activités très faibles, typiquement de l'ordre de quelques 0,01 Bq/kg pour un échantillon solide ou liquide.

Pour les mesures de radionucléides en ultra-traces pour lesquelles une sensibilité de l'ordre de quelques 0,0001 Bq/kg pour un échantillon est nécessaire, 2 détecteurs Germanium supplémentaires sont installés en site très profond (à l'abri des rayons cosmiques) à 1800 m sous terre, dans le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM) à la frontière franco-italienne. Ils sont opérés à distance avec le personnel technique du LSM.

Les études conduites par le groupe Neutrino dans le cadre des projets SuperNEMO et JUNO mobilisent la plateforme à hauteur d'environ 200 échantillons mesurés annuellement. De nombreux types de matériaux (plastique, colles, métaux, photodétecteurs, composants électroniques) ont ainsi été vérifiés sur la plateforme. C'est en ce sens un outil unique qui donne aux scientifiques du CENBG un impact important dans toutes les expériences scientifiques où le bruit de fond radioactif est important.

Par ailleurs, plusieurs études exploratoires (réf. [PRAV18_1], [PRAV18_2], [PRAV18_3], [PRAV18_4]) sur des applications environnementales sont conduites sur la plateforme. L'objectif est souvent de pouvoir transférer la méthodologie de mesure vers Prisma Prestation.



For 1 m² surface sample → emanation rate < 400 Rn atoms/day (95% C.L.)

For 30 m² surface sample → emanation rate < 12 Rn atoms/day (95% C.L.)

Courbe de sensibilité du dispositif d'émanation Radon en fonction de la surface de l'échantillon.

2

MÉTROLOGIE DU ²²²Rn PAR ÉMANATION

Une plateforme de métrologie du radon (²²²Rn) existe au CENBG depuis 2013. Cette installation se compose d'une cuve d'émanation de 0,7 m³ couplée à un détecteur électrostatique et une diode silicium capable de mesurer les descendants du radon ²²² (²¹⁸Po et ²¹⁴Po). La sensibilité du système dépend directement de la surface de l'échantillon mesuré. La taille exceptionnelle de la chambre d'émanation permet dans ce cadre de réaliser des mesures d'échantillons de grande taille. Ainsi des mesures sur des films de plusieurs dizaines de mètres carrés permettent d'atteindre des sensibilités de seulement quelques dizaines d'atomes émanés par jour et par mètre carré de surface exposée, contre quelques centaines d'atomes dans le cadre d'échantillons de l'ordre du mètre carré.

Au cours des dernières années, ce dispositif a notamment permis de mener une étude exhaustive de l'émanation du Radon dans les verres des photomultiplicateurs utilisés sur les expériences neutrino SuperNEMO et JUNO provenant de plusieurs fabricants (Hamamatsu, NNV, HZC) et avec des tailles de photomultiplicateurs très variées, allant de 3'' à 20'' de diamètre. Elles ont permis de caractériser une partie du bruit de fond de ces projets, mais aussi de diriger les fabricants vers l'utilisation de certains verres lors des productions de ces détecteurs. Plusieurs communications en réunions internationales de collaboration ont été conduites sur chacun de ces projets, des publications ont été réalisées et d'autres sont en cours de rédaction (réf. [BARA18] et [CERN15]).

Ce dispositif a aussi permis de conduire une étude originale, commandée par la branche radioprotection du Groupe Prévention Environnement & exploitation (GPEx), intégré à l'Unité National d'Ingénierie en Exploitation (UNIE) d'EDF, concernant la fixation des descendants du radon (²²²Rn) sur les vêtements des opérateurs intervenant dans les installations nucléaires d'EDF. Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'une communication scientifique [KARS19] qui a obtenu la médaille de bronze du prix Henri Jammot. Des prolongements à cette étude sont envisagés pour 2020.



Étude
EDF

PROSPECTIVE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE PRISNA: MÉTROLOGIE ET CARTOGRAPHIE 3D DU ^{238}U ET ^{232}Th PAR ABLATION LASER COUPLÉE À UN ICPMS HAUTE RÉOLUTION

Une étude exploratoire a été conduite dans le cadre d'une prospective scientifique et technique de la plateforme PRISNA. Quels sont les besoins en termes de métrologie de radionucléides en ultra-traces pour les expériences scientifiques pour la prochaine décennie ? Quelles techniques permettront de parvenir à ces mesures ? Comment la plateforme PRISNA, avec ses spécificités peut y contribuer ? Telles sont les questions qui doivent se poser pour préparer l'évolution de nos outils de mesures et de nos compétences.

Dans ce cadre, des mesures prometteuses ont été réalisées en 2019 à l'aide d'un laser couplé à un ICPMS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) pour déterminer la contamination en surface et en volume d'un échantillon d'acrylique de JUNO. Ce dispositif

unique au monde, situé à l'Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux (IPREM) de l'Université de Pau, dans notre région Nouvelle Aquitaine, a permis une première cartographie en trois dimensions de la distribution des éléments ^{238}U et ^{232}Th dans l'acrylique avec de surcroît une analyse quantitative de grande sensibilité en-deçà de 10^{-12} g/g.

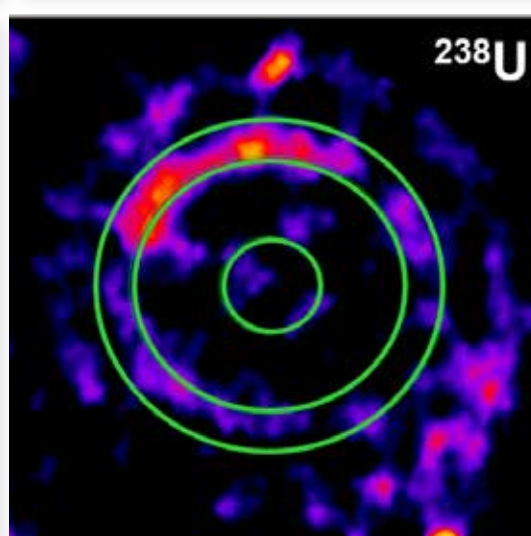
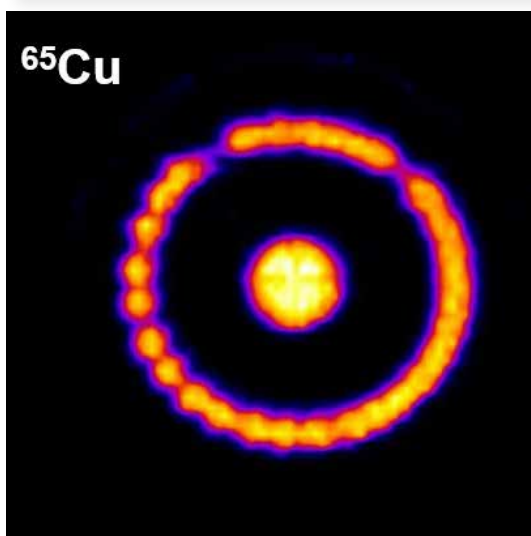
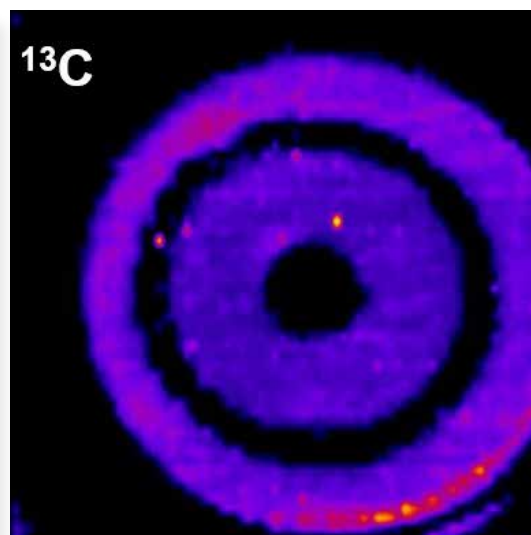
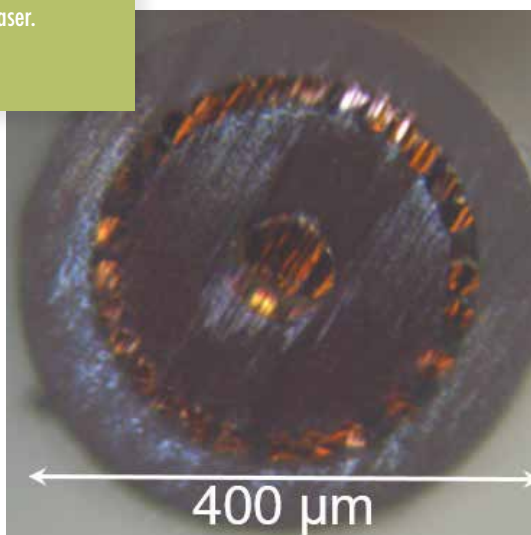
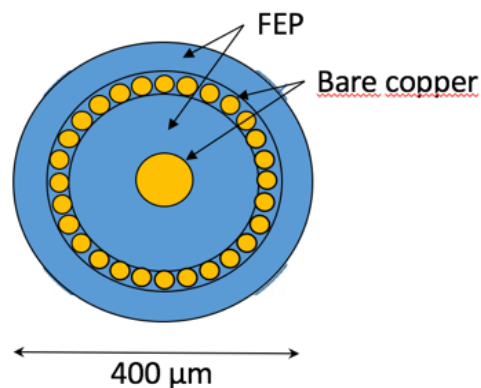
Ces travaux ont fait l'objet d'une communication scientifique [PERR19]. D'autres échantillons d'intérêt en physique du neutrino sont également en cours d'investigation grâce à cette technique quasiment unique au monde.

La question du futur de la plateforme dans son environnement régional et scientifique sera discutée dans l'année 2020.

Personnels du CENBG auprès du dispositif d'ablation laser couplé à un ICPMS haute résolution à l'Institut des Sciences Analytiques et de Physico-Chimie pour l'Environnement et les Matériaux (IPREM) de l'Université de Pau.



Cartographie de l' ^{238}U dans la tranche d'un câble coaxial de 400 μm de diamètre. A gauche le schéma du câble, au centre une image obtenue au microscope, à droite la cartographie de l' ^{238}U obtenue par ICPMS par ablation laser.



- [PRAV18_1] Neutrino, wine and fraudulent business practices, M.S. Pravikoff, P. Hubert, H. Guegan. 15th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Jun 2018, Varenne, Italy. pp.287-294
- [PRAV18_2] Dating of wines with cesium-137: Fukushima's imprint, M.S. Pravikoff, P. Hubert, arXiv:1807.04340
- [PRAV18_3] Natural Radioactivity Measurements Applied to the Dating and Authentication of Edible Meat, Michael S. Pravikoff, P. Hubert, H. Guégan, arXiv:1806.10455
- [PRAV18_4] Environmental Lead-210 gamma-ray measurements in brain tumors, M.S. Pravikoff, C. Marquet, P. Hubert, arXiv:1806.10455
- [BARA18] Calorimeter development for the SuperNEMO double beta decay experiment, A.S. Barabash et al., Nucl. Instrum. Meth. A868 (2017) 98-108
- [CERN15] Radon emanation based material measurement and selection for the

SuperNEMO double beta decay experiment, C. Cerna, B. Soulé and F. Perrot, Low Radioactivity Techniques 2015 (LRT2015), AIP, Conference Proceedings 1672, 050002 (2015)

[KARS19] Impact du radon sur le déclenchement des portiques de contrôle radiologique en sortie de zones contrôlées, M.Karst et C.Cerna, Congrès national de la Radioprotection de la SFRP, La Rochelle (2019)

[PERR19] Sensitivity and advantages of laser Ablation ICPMS and comparison with other technics on several materials, F.Perrot, C.Cerna, C.Pecheyran, Low Radioactivity Techniques 2019 conference, Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC), Spain (2019)



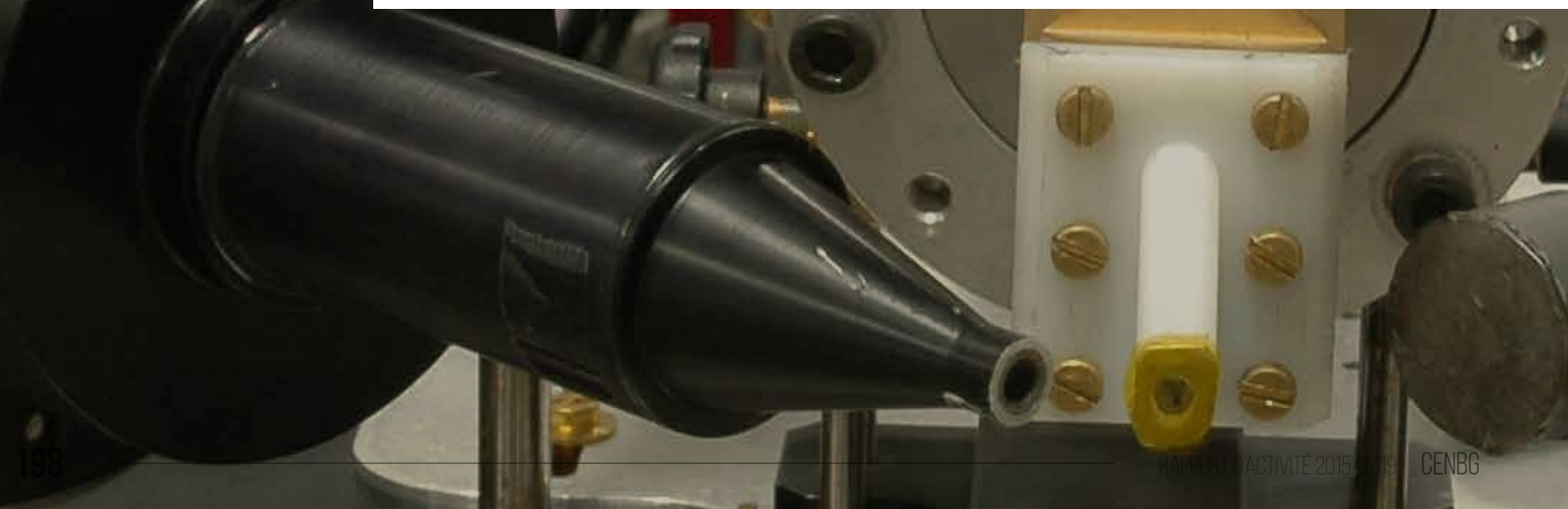
ARCANE

et les faisceaux d'ions
produits par accélérateur



PRISNA-*Prestations*

et la spectrométrie γ
à bas-bruit de fond



ABSTRACT

The technology transfer unit ARCANE uses 1H^+ , 2H^+ , 4He^+ , ion beams produced by the two accelerators of the center: the former 4MeV Van De Graaff accelerator and the 3.5MeV singletron of the AIFIRA platform, for energies ranging from 300KeV to 3MeV. Their use is governed by an agreement between the CNRS, the University of Bordeaux, and ADERA, which manages the structure, which must ensure its self-financing both in terms of operation and the salaries of the 3 employees. The unit provides an service in surface analysis, but in recent years complementary activities such as material irradiation or the production of high-energy gamma fields for the calibration of radiameter have been developed.

RÉSUMÉ

La cellule de transfert de technologie ARCANE exploite les faisceaux d'ions légers (1H^+ , 2H^+ , 4He^+) produits par les deux accélérateurs du centre: l'ancien accélérateur 4MeV de type Van De Graaff et le singletron 3.5MeV de la plateforme AIFIRA, pour des énergies allant de 300KeV à 3MeV. Leur utilisation est régie par une convention liant le CNRS, L'Université Bordeaux, et l'ADERA, qui gère administrativement la structure, qui doit assurer son auto-financement aussi bien en fonctionnement qu'en salaire des 3 personnes employées. L'activité de prestations industrielles qu'elle produit avec ces faisceaux d'ions est centrée sur l'analyse de surface, mais ces dernières années ont vu le développement d'activités complémentaires telles que l'irradiations de matériaux, ou la production de flux de gammas de haute énergie pour l'étalonnage de radiamètres.

ABSTRACT

In addition to the ARCANE technology transfert unit, there is a second "PRISNA-Prestations" unit, built on the same business model and working with the same staff, but focused on the operation of a low background germanium spectrometer located in the PRISNA platform. Here too, the initial core business of pure analysis (implemented under ASN approvals or COFRAC accreditation) has been gradually supplemented by an offer integrating data interpretation, on-site expertise, impact studies, and second-level radiation protection studies.

RÉSUMÉ

En complément de la cellule ARCANE, il existe une deuxième cellule "PRISNA-Prestations", construite sur le même modèle économique et oeuvrant avec les mêmes personnels, mais centrée sur l'exploitation d'un spectromètre germanium à bas bruit de fond localisé dans la plateforme PRISNA. Ici aussi, le cœur de métier initial lié à l'analyse pure (conduite sous agréments ASN ou accréditation COFRAC), a été complétée au fur et à mesure par une offre intégrant l'interprétation des données, l'expertise sur site, les études d'impact, et la radioprotection de deuxième niveau.

PERMANENTS

Hervé GUÉGAN
Quy LE MINH
Benoît RIDARD



PERMANENTS

Gérard CLAVERIE
Hervé GUÉGAN
Quy LE MINH
Michel PRAVIKOFF
Benoît RIDARD

Depuis 1990, la structure ARCANE propose aux industriels des études et prestations de service par techniques mettant en œuvre des faisceaux d'ions légers ($^1\text{H}^+$, $^2\text{H}^+$, $^4\text{He}^+$) produits par accélérateur, pour des énergies allant de 300KeV à 3MeV:

- Sur l'ancienne installation Van De Graaff qui a été reprise en charge et maintenue opérationnelle par la cellule, essentiellement à des fins d'irradiation.
- Sur la "nouvelle" installation AIFIRA, qui est utilisée pour l'analyse par faisceaux d'ions en macro et microfaisceaux, en faisceau extrait à l'air, et sur laquelle nous avons également développé un moyen de production d'un champ de rayonnement γ de haute énergie ($\approx 6\text{MeV}$).

La cellule est composée de 3 personnes employées par l'ADERA, et s'autofinance à 100% par les prestations de service qu'elle produit, en reversant une partie de son chiffre d'affaire au laboratoire, qui lui-même le re-injecte dans le fonctionnement de la plateforme AIFIRA. Il faut souligner que l'équilibre financier est assuré par l'existence de la deuxième cellule PRISNA-Prestations sur laquelle opèrent les mêmes personnes.

Pour fixer les ordres de grandeur du niveau d'activité (qui est assez fluctuant d'une année à l'autre), nous traitons entre 60 et 90 dossiers par an pour le compte d'une trentaine de clients différents (pour un portefeuille total d'une centaine de clients actifs). Cela représente entre 300 et 500 analyses annuelles, pour un chiffre d'affaire oscillant entre 180 et 230 K€HT.

Sur les 5 dernières années, les activités "historiques" de la cellule n'ont que peu changé, avec un cœur de métier restant centré sur la caractérisation des couches minces, en particulier celles utilisées en micro-électronique, mais aussi en optique, optronique et mécanique.

Nous essayons toutefois de développer une expertise "matériaux" plus large, mais le recours nécessaire à d'autres méthodes analytiques en sous-traitance freine l'augmentation de cette activité, à cause des frais de gestion qui nous sont appliqués, et qui diminuent d'autant la marge que l'on peut espérer de ces actions.

Outre l'effort commercial qui ne doit jamais se relâcher, la diversification des activités a toujours été le fil conducteur de la vie de la cellule depuis sa création. Parmi celles-ci, le développement conduit sur la "ligne de physique" de la plateforme d'un champ de rayonnement γ de haute énergie est la plus aboutie. Nous pouvons effectivement proposer aujourd'hui un service d'étalonnage de radimètres et dosimètres dans la gamme des 6MeV, suivant les recommandations de la norme ISO 4037-1. Cette "facilité", la troisième existant dans le monde (après celle du PTB en Allemagne et du JAEA au Japon), qui est en cours de raccordement avec l'étalon primaire, est le fruit d'un travail avec certaines équipes de recherche et services techniques du CENBG, en plus d'une collaboration avec le CEA-LNHB qui est le service du Laboratoire National d'Essai pour ce qui est des rayonnements ionisants.



Ce travail de la mise sur pied d'un service de métrologie est aussi la conséquence de l'expérience acquise en la matière sur PRISNA-Prestations. Il traduit également les efforts qui ont été conduits en matière d'assurance qualité sur cette cellule. En effet, faute d'agrément possible, ou de champ d'accréditation COFRAC existant pour ces techniques d'analyse par faisceaux d'ions, nous nous sommes lancés vers la voie de la labellisation de la structure. Celle-ci repose sur l'obtention du label "Fiabilité Mesure", délivré par le Centre Technologique Méditerranéen de Métrologie (CT2M) qui a développé son propre référentiel, basé sur les préceptes des normes NF EN ISO 9001 et NF EN ISO/CEI 17025.

Outre la rigueur métrologique pure, et la confiance qu'elle donne au client quant à la qualité des résultats et du service rendu, cette démarche permet un management par la qualité qui va jusqu'à la structuration organisationnelle. Elle se traduit en particulier par la tenue annuelle de "revues de direction" associant la direction du laboratoire et la direction de l'ADERA, afin de définir la stratégie à tenir pour la cellule, en plus de faire un bilan de l'activité annuelle passée.



Avec la création de la plateforme PRISNA au CENBG en 2009, nous avons mis en place une nouvelle unité de transfert de technologie "PRISNA-Prestations", basée sur l'utilisation d'un détecteur Germanium "bas-bruit de fond" dont nous avons été doté. Sa finalité est de proposer des analyses, études et expertises dans le domaine de la radioactivité environnementale, qui permet de contribuer à l'équilibre financier de la totalité des deux cellules "ARCANE" et "PRISNA-Prestations", dans lesquelles opèrent les mêmes personnels de l'ADERA, en plus de deux agents CENBG ici. Si un système assurance qualité existe sur les 2 structures, celui de PRISNA-Prestations est plus poussé puisque nous disposons de différents agréments ASN, et d'une accréditation COFRAC, pour réaliser les analyses par spectrométrie γ .

Depuis 2015, le début de cette période de rapport d'activité, la structure a ainsi trouvé son positionnement sur le marché, entre prestations analytiques pures, et prestations intellectuelles pouvant nécessiter des mesures.

Ces dernières exigent un bon bagage en radioprotection, en plus d'une compréhension plus large des phénomènes physiques mis en jeu, une bonne connaissance de la législation du travail, du droit de l'environnement et du code de la santé publique. Ces études nécessitent également l'accès à toute la panoplie des techniques analytiques de laboratoire qui sont demandées en complément des appareils classiquement utilisés en radioprotection de premier niveau.

Sans détailler la totalité de nos activités, nous pouvons les regrouper en plusieurs catégories, qui s'appuient toutes sur un avantage concurrentiel lié soit à nos performances instrumentales, soit à notre proximité géographique, soit à la l'image d'indépendance de l'institution, soit encore à notre crédibilité scientifique qui commence à être reconnue. C'est d'ailleurs souvent l'association de plusieurs de ces facteurs qui oriente le choix du client vers nos offres.

Les caractéristiques du détecteur, du fait de son faible bruit de fond, en plus de sa bonne efficacité de détection, sont particulièrement déterminantes soit pour obtenir d'excellentes limites de détection, soit pour une limite de détection demandé de réaliser la mesure dans un temps plus court ou avec moins de matière.

La proximité géographique du laboratoire est principalement décisive pour deux types de situation:

- Lorsqu'il existe un besoin d'intervention sur place, soit pour expertiser un site contaminé, soit pour caractériser plus finement un échantillon radioactif en vue de son évacuation ANDRA (par exemple dans une décharge après déclenchement d'un portique, ou pour identifier une source "orpheline").
- Lorsque les mesures portent sur des radionucléides à vie courte, comme ceux utilisés en médecine nucléaire à des fins de thérapie ou de diagnostic. Dans ce cadre, nous avons ainsi la confiance du CHU de Bordeaux, qui nous confie de façon exclusive la caractérisation de ses effluents, et le contrôle des cuves de décroissance.

L'expertise que nous avons développé au cours de nos interventions sur des chantiers ayant de plus en plus d'ampleur (P.ex découverte d'une contamination au radium sur le chantier d'une école maternelle au cœur de la ville de Bordeaux), nous a permis de

postuler à des appels d'offres plus larges. A titre d'exemple, nous avons ainsi été retenus:

- Comme tiers-expert auprès de l'ASN sur un site contaminé à l'uranium manufacturé ayant appartenu au CEA, puis repris par PLACOPLATRE, afin d'y exploiter une poche de gypse.
- Pour conduire une étude d'impact des rejets dans l'environnement des effluents hospitaliers du CHU de Bordeaux.

Enfin dans le domaine de la radioactivité naturelle renforcée, nous avons développé un savoir-faire bien spécifique qui permet d'évaluer les doses d'exposition auxquelles sont soumis les travailleurs et les clients des établissements thermaux. A partir de la grille des types de soins remboursés par la CPAM, nous avons ainsi construit un modèle d'exposition pour le compte du Conseil National des Etablissements Thermaux, que nous déclinons maintenant aux établissements français souhaitant se mettre en conformité avec la réglementation.

Il n'est pas l'objet ici de présenter un compte d'exploitation moyen de la cellule, mais pour fixer les ordres de grandeur, le chiffre d'affaire généré par PRISNA-Prestations représente 80-90K€HT par an, soit 150-180 analyses facturées (hors assurance qualité), réparties sur 35-40 dossiers, pour un portefeuille d'une soixantaine de clients à l'heure actuelle.

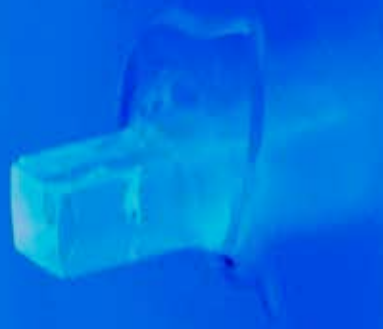
Il faut enfin souligner que l'équilibre économique de PRISNA-Prestations était initialement basé sur la création et le soutien du réseau BECQUEREL par l'IN2P3, qui devaient être un apporteur d'affaire au groupement de laboratoires le constituant. La disparition factuelle du réseau depuis plus de 2 ans met désormais en péril le modèle économique de PRISNA-Prestations, et plus largement l'existence même des 2 structures de transfert de technologie.



Echantillonnage
des eaux
superficielles
sur la
Dordogne

P2R

Laboratoire commun Physique des Particules pour la Radioprotection



- M. Karst, C. Cerna, Impact du Radon sur le déclenchement des portiques de contrôle radiologique en sortie de zones contrôlées, Congrès National de Radioprotection SFRP – La Rochelle, 18, 19 & 20 juin 2019
- C. Cerna, Poster LabCom P2R à la journée des LabCom ANR (Maison de la Chimie, Paris), 27 septembre 2018
- C. Cerna, Créer des laboratoires virtuels faisant appel à des équipes de plusieurs UMR, invitation au séminaire de la Direction des Relations avec les Entreprises (DIRE) du CNRS et des Service Partenariat et Valorisation des Délégations Régionales du CNRS, 27 novembre 2018
- C. Cerna, Participation au Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale WISG 2018 organisé par l'ANR (Lyon), 16-17 Octobre 2018
- C. Cerna, Participation au Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale WISG 2019 organisé par l'ANR (Paris), 01–02 octobre 2019
- Signature promotionnelle du lancement du LabCom P2R au CENBG par Manuel Tunon de Lara, Président de l'Université de Bordeaux, Reynald Pain, Directeur de l'IN2P3 et Maxime Karst, co-gérant de CARMELEC lors des 50 ans du CENBG, juillet 2017
- Inauguration du LabCom P2R au CENBG, sur l'invitation du CNRS et de l'Université de Bordeaux, 18 juillet 2018
- C. Cerna, Stand LabCom P2R et valorisation au CENBG, au Forum annuel des adhérents du pôle de compétitivité Alpha RLH (Aéro-campus, Latresne), 21 mars 2019
- T. Le Noblet, Stand Labcom P2R à Cap Science Bordeaux pour la soirée de lancement des 80 ans du CNRS en Nouvelle Aquitaine, 21 juin 2019

ABSTRACT

Based on a strong collaboration between the Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) and the Carmelec company, the first joined laboratory of IN2P3, the P2R joined laboratory (Particles Physics for Radiation protection) has been created in July 2017. The P2R team gathers physicists and engineers from CNRS and Carmelec company. Its main aim is the development of innovative detectors for radiation protection by using the state of the art knowledges and technics in nuclear instrumentation and particle physics. The P2R joined laboratory is strongly involved in valorization and technology transfert.

RÉSUMÉ

Issu d'une collaboration étroite entre la PME Carmelec, spécialisée dans la radioprotection, et le CENBG, le premier laboratoire commun de l'IN2P3, le Laboratoire Commun Physique des Particules pour la Radioprotection (P2R), a vu le jour en juillet 2017. L'équipe P2R regroupe des chercheurs et des ingénieurs issus du CNRS et de la société Carmelec. Son objectif principal est de développer des appareils de radioprotection innovants en utilisant les dernières avancées technologiques en instrumentation nucléaire et en physique des particules. Le LabCom P2R participe ainsi fortement à la valorisation et aux transferts de savoir-faire et de technologies du monde de la recherche vers le monde l'industriel.

Les travaux du laboratoire commun P2R sont centrés sur le développement de détecteurs innovants pour la radioprotection afin de répondre aux besoins de santé publique, de contrôle et de sécurité.

L'entreprise partenaire, la société Carmelec, est spécialisée dans la conception et la fabrication d'appareils de mesure dans les domaines de la radioprotection et du Contrôle Non Destructif (CND). Son siège est basé à Perpignan.

Soutenu par un co-financement de l'ANR et de la société Carmelec, le LabCom P2R s'appuie sur le partenariat du laboratoire porteur, le CENBG, et de la société Carmelec, mais aussi sur le réseau des autres laboratoires de l'IN2P3, ses méthodes de travail, ses outils communs et sa gestion. Cette coopération au sein de l'IN2P3 renforce la capacité du LabCom P2R à développer ses recherches. Deux autres laboratoires sont associés au consortium: le Laboratoire Souterrain de Modane (LSM, Université de Grenoble-Alpes et CNRS/IN2P3) et le Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM, Aix-Marseille Université et CNRS/IN2P3). Une nouvelle collaboration avec l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC, Strasbourg CNRS/IN2P3) a aussi débuté en 2018.

Ce projet de LabCom a été labélisé par deux pôles de compétitivité: le pôle Alpha RLH (auquel le CENBG adhère) et celui de l'industrie nucléaire Nuclear Valley (auquel Carmelec adhère).

Les technologies de détection des émissions radioactives progressent en permanence et permettent de répondre à des normes de plus en plus contraignantes afin de limiter les risques encourus par les personnels intervenant dans des sites potentiellement contaminés. En particulier, dans le cadre du démantèlement ou de la modernisation des centrales nucléaires, la demande en radioprotection est soutenue et continuera à augmenter dans les années à venir. Par ailleurs, de nouveaux besoins sociétaux font aussi leur apparition en termes de sécurité et de protection des populations.

CNRS

Cédric CERNA

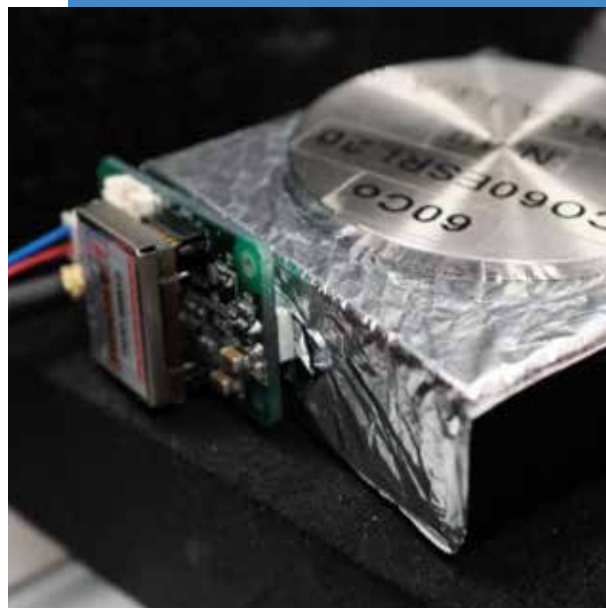
Jean JOUVE

Thibaud LE NOBLET

CARMELEC

Arnaud HUBER

P2R



Le programme scientifique et technique de ce Laboratoire Commun est axé sur la détection des rayonnements ionisants en appliquant des techniques innovantes issues de la recherche fondamentale en physique des particules et pouvant être industrialisées. Il profite des différents domaines de compétences théoriques et techniques de chacun des membres de l'équipe: expertise en physique nucléaire, en photo-détection, en simulations numériques et en analyse de données.

Des axes de recherches cadrés ont été identifiés et sont régulièrement discutés au sein du comité de pilotage qui regroupe tutelles et entreprise :

- La mesure de contamination surfacique en radiation bêta dans des environnements de radiation gamma important et fluctuant ;
- La mesure des neutrons rapides notamment des colis nucléaires en présence d'un flux important de radiations gamma ;
- Le développement d'un détecteur pour la détection du radon (gaz radioactif naturel) dans le cadre de la santé publique ;
- Le développement de capteurs en réseau pour des actions de sécurité publique et privé.

<http://labcom-p2r.in2p3.fr/>

ENSEIGNEMENT FORMATION À ET PAR LA RECHERCHE

ACTIVITÉS DE FORMATION

208 Enseignement | Formation

THÈSES ET STAGES

210 Thèses | HDR

212 Stages

ENSEIGNEMENT | FORMATION

En tant qu'unité mixte Université de Bordeaux/IN2P3, le CENBG est naturellement impliqué dans la formation à travers ses 16 enseignants-chercheurs qui interviennent à tous niveaux dans les enseignements généraux à l'Université et de l'IUT d'une part mais surtout en tant qu'acteurs principaux de l'offre de formation autour des thématiques de la physique subatomique et de la physique des hautes énergies. Ces enseignements de physique nucléaire débutent en Licence amenant l'étudiant à une spécialisation progressive. Les cours théoriques sont accompagnés d'une forte composante pratique à travers de Travaux Encadrés de Recherche s'appuyant sur une salle de Travaux Pratiques dédiée à la physique nucléaire sur le campus de l'université, ainsi que sur les équipements du laboratoire (Aifira, Prisma,...).

Il est aussi à noter la forte implication des enseignants et chercheurs du laboratoire dans la formation des futurs professeurs de Lycée dans le cadre des master MEEF et du parcours Agrégation de Physique ainsi que dans celle des enseignants en activité lors de formations PAF dans les académies de Bordeaux et d'Ile de France.



1

2015 – 2019 UN EFFORT DE STRUCTURATION DE L'OFFRE DE FORMATION À L'UNIVERSITÉ

La période 2015-2019 a été marquée par de nombreux changements à l'Université tant du point de vue de son organisation générale que de celle de ses formations. Cette période a été mise à profit par les enseignants-chercheurs du CENBG pour proposer des cursus autour des thématiques du laboratoire plus lisibles pour les étudiants.

permettant une spécialisation accrue des étudiants.

Le changement du nom de la mention de Master de Physique à Master de Physique Fondamentale et Applications a marqué la volonté d'ancrer clairement les parcours à vocations professionnalisante dans le paysage global du master.

Cet affichage a accompagné la montée en puissance du parcours Instrumentation Nucléaire désormais ouvert à l'apprentissage. Les efforts constants d'échange avec les partenaires industriels ont permis à la formation d'être identifiée comme un vivier de diplômés capables d'occuper des postes d'encadrement comme l'atteste le taux d'insertion niveau cadre du parcours IN proche de 100% et les progressions rapide de carrière des anciens diplômés.

2

NOUVELLE ACCRÉDITATION, UNE NOUVELLE ORGANISATION DU MASTER

La mise en place d'une nouvelle approche de construction des formations avec le passage d'un mécanisme d'habilitation pour lequel l'organisation des diplômes étaient plus ou moins figées sur une durée de 5 ans à un mécanisme d'accréditation dans lequel les formations reconnues par le ministère ont la possibilité de faire évoluer leur offre dans le cadre d'un processus d'amélioration continue. Les équipes du CENBG ont profité de cette transition pour entamer une réflexion sur la construction de cursus affichant une meilleure lisibilité de la formation en physique subatomique à Bordeaux. Ainsi, la nouvelle accréditation a vu la création d'un parcours recherche Noyaux Plasma Univers (NPU) et d'un parcours Laser Matière Nanosciences en lieu et place de l'ancien parcours Physique dont la finalité était peu lisible pour les étudiants malgré des contenus exigeants préparant à la thèse. Cette démutualisation a permis d'ouvrir le parcours recherche à des formes d'enseignement innovantes faisant la part belle aux projets

3

VERS DES PARCOURS ENRICHIS

Le processus d'évolution des diplômes universitaires démarré depuis une dizaine d'années, a conduit les enseignants-chercheurs du CENBG à s'inscrire dans la construction de parcours de formation enrichis permettant aux étudiants d'acquérir de nouvelles compétences ou de nouvelles expériences telles des mobilités internationales.

CMI

Un Cursus Master en Ingénierie (CMI) en physique a vu le jour en 2016 à l'université. Ce cursus sélectif a pour objectif de former des cadres techniques dans les domaines de l'instrumentation pour la physique des rayonnements.

Il s'appuie fortement sur la recherche et sur l'expertise des laboratoires CELIA, LOMA et CENBG dans la détection, la métrologie et la modélisation des rayonnements.

Le CMI physique repose sur la licence de physique et le master instrumentation renforcé à hauteur de 20% par des UE de mises en situation (projets en laboratoire, stages), de sciences de l'ingénieur

(programmation, électronique) ainsi que des enseignements d'ouverture socio-économique et culturelle.

EUR

Répondant au second appel d'offre sur la construction d'Écoles Universitaires de Recherches, le CENBG s'est associé au LAB pour proposer l'EUR « Infinity2 » dont l'objectif est d'offrir une formation de très haut niveau autour de l'instrumentation, et du traitement massif des données auprès des grands instruments. Le projet qui s'inscrit dans un schéma intégré de formation Master-Doctorat, s'appuie sur la structure des parcours NPU et Instrumentation Nucléaire du Master, et propose des modules complémentaires de haut niveau bénéficiant des compétences spécifiques des intervenants engagés dans les grandes expériences en Physique Subatomique, Physique des Hautes Energies et Astrophysique. L'objectif de l'EUR « Infinity2 » est de former des étudiants aux méthodes de traitement moderne des données (big data, data mining, IA, etc.), capables de répondre aux grands défis posés par l'exploitation des instruments de dernière génération en terme de volume et de complexité de l'information collectée.

LICENCE PROFESSIONNELLE

Depuis le printemps 2019, un projet de Licence professionnelle autour des thématiques du démantèlement des installations industrielles sensibles à vu le jour en réponse à une sollicitation du Campus des métiers et des qualifications « Maintenance en environnement sensible ». La contribution du CENBG portera sur les aspects liés au démantèlement nucléaire, en particulier, les problématiques de radioprotection. L'ouverture de cette licence professionnelle devrait permettre de compléter l'offre de formation actuelle autour des thématiques du nucléaire sur Bordeaux et sa proche région du CAP au Master.

4

DES COMPÉTENCES DANS LE LABORATOIRE VALORISÉES DANS LES FORMATIONS

Les activités de formation du « noyau dur » d'enseignants-chercheurs du laboratoire sont complétées par les interventions souvent plus spécialisées d'un certain nombre de chercheurs CNRS en particulier au niveau Master 2 pour ce qui est des cursus universitaires ou dans le cadre d'écoles thématiques plutôt destinées à un public de doctorants, post-doctorants et jeunes chercheurs. Ces interventions peuvent aussi avoir comme cadre plus inattendu le lycée à travers des MasterClasses destinées à sensibiliser les élèves des filières scientifiques aux métiers de la recherche dans le cadre concret d'analyse de véritables données issues des expériences.

Les fortes compétences techniques développées par les services d'appui à la recherche, caractéristique des laboratoires de l'IN2P3, sont aussi largement transmises par les ingénieurs et techniciens à travers l'encadrement de nombreux stages techniques mais aussi à travers des enseignements à tous les niveaux dans un nombre très variés de filières à vocation professionnelle Master pro ou recherche, Licence Pro, DUT ou à travers la participation et l'organisation d'école thématiques techniques.

Au final, c'est près de la moitié des personnels du laboratoire qui participent à la transmission de leurs compétences dans une grande variété de cadre de formation académique ou non.

Le tableau suivant présente le résumé des responsabilités de filières au sein de l'Université de Bordeaux assurées par les enseignants-chercheurs du CENBG.

FILIÈRE DE FORMATION UB	RESPONSABLE	ANNÉES
Ecole Doctorale SPI	Franck GOBET	2017
Mention Master Physique ¹	Denis DUMORA	2011-2016
Parcours Instrumentation Nucléaire	Philippe MORETTO Claire MICHELET	2009-2016 2009-2016
Parcours Physique Nucléaire et Applications / délocalisé à Hanoï	Philippe QUENTIN	2007-2015
Mention Master Physique Fondamentale et Application	Denis DUMORA	2016-2018
Equipe pilotage Parcours NPU	Franck GOBET	2016-
Parcours Instrumentation Nucléaire	Claire MICHELET Maud VERSTEEGEN	2009- 2018-
M1 Parcours Physique Fondamentale	Christophe CHAMPION	2016-2018
M1 Parcours Physique Fondamentale	Marie-Hélène GRONDIN	2018-
CMI rayonnements et instrumentation	Philippe BARBERET	2016-
Licence professionnelle GTI2N	Serge CZAJKOWSKI	2009-2016
Master métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation (MEEF) – 2nd degré Physique-Chimie / Partie Physique	Jean-Christophe CAILLON	2013-
Master métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation (MEEF) – 2nd degré CAPLP Math-Sciences physiques / Partie Physique	Maud VERSTEEGEN	2017

THÈSES

2015

Benjamin SOULÉ

Recherche des désintégrations double bêta avec et sans émission de neutrinos du ^{82}Se vers les états excités du ^{82}Kr dans l'expérience NEMO3 : développement de dispositifs de mesure ultra-sensibles d'émanation du Radon pour l'expérience SuperNEMO

Groupe de recherche: Neutrino
Direction: F. PIQUEMAL, F. PERROT
Soutenance: Décembre 2015

Quentin DUCASSE

Etude de la méthode de substitution à partir de la mesure simultanée des probabilités de fission et d'émission gamma des actinides ^{236}U , ^{238}U , ^{237}Np et ^{238}Np

Groupe de recherche: ACEN
Direction: O. SEROT, B. JURADO
Soutenance: Octobre 2015

Meng-Hok KOH

Fission-barriers and energy spectra of odd-mass actinide nuclei in self-consistent mean-field calculations

Groupe de recherche: THÉORIE
Direction: L. BONNEAU, Ph. QUENTIN,
H-B. WAGIRAN
Soutenance: Octobre 2015

2016

Cécile MAGRON

Mesures précises des demi-vies et rapports d'embranchement pour la décroissance β des noyaux miroir ^{23}Mg et ^{27}Si

Groupe de recherche: Noyaux Exotiques
Direction: B. BLANK
Soutenance: Septembre 2016

Latsamy XAYAVONG

Calculs théoriques de corrections nucléaires aux taux de transitions β super-permises pour les tests du Modèle Standard

Groupe de recherche: THÉORIE
Direction: N. SMIRNOVA
Soutenance: Décembre 2016

Antoine DE ROUBIN

Mass measurements of neutron-rich strontium and rubidium isotopes in the $A \approx 100$ and development of an electrospray ionization ion source

Groupe de recherche: Noyaux Exotiques
Direction: B. BLANK
Soutenance: Décembre 2016

Maxime KARST

Mesure et discrimination de rayonnements bêta et gamma dans une ambiance gamma élevée et fluctuante: conception, développement et caractérisation d'un contaminamètre haute sensibilité

Groupe de recherche: Neutrino
Direction: F. PIQUEMAL, C. CERNA
Soutenance: Décembre 2016

Sylvain MEYLAN

Développement d'un outil de simulation multi-échelle adapté au calcul des dommages radio-induits précoces dans des cellules exposées à des irradiations d'ions légers (proton et alpha)

Groupe de recherche: ICS
Direction: S. INCERTI
Soutenance: Octobre 2016

2017

Arnaud HUBER

Recherche de la nature du neutrino avec le détecteur SuperNEMO: simulations optiques pour l'optimisation du calorimètre et performances attendues pour le ^{82}Se

Groupe de recherche: Neutrino
Direction: Ch. MARQUET
Soutenance: Septembre 2017

Thomas GOIGOUX

Etude de la radioactivité deux-protons de ^{67}Kr et développement d'une chambre à projection temporelle

Groupe de recherche: Noyaux Exotiques
Direction: G. Giovinazzo
Soutenance: Octobre 2017

Medhi AOUADI

Détermination du rapport d'embranchement de la transition superpermise du carbone ^{10}C et développement et intégration de la ligne PIPERADE au CENBG

Groupe de recherche: Noyaux Exotiques
Direction: S. GREVY
Soutenance: Décembre 2017

Giovanna MUGGIOLU

Deciphering the biological effects of ionizing radiations using charged particle microbeam: from molecular mechanisms to perspectives in emerging cancer therapies

Groupe de recherche: IRIBIO
Direction: H. SEZNEC
Soutenance: Mai 2017

Benjamin CONDON

Observations de vestiges de supernovæ en coquille avec le Fermi Large Area Telescope

Groupe de recherche: ASTROPARTICULES
Direction: M. LEMOINE-GOUMARD
Soutenance: Mai 2017

2018

Gwénaelle GILARDY

Measuring the $7\text{Li}(\alpha; g)^{11}\text{B}$ reaction rate at temperatures relevant for the n-process

Groupe de recherche: Noyaux Exotiques

Direction: B. BLANK

Soutenance: Décembre 2018

Miroslav MACKO

Expérience SuperNEMO: Études des incertitudes systématiques sur la reconstruction de traces et sur l'étalonnage en énergie. Evaluation de la sensibilité de la Onbb avec émission de Majoron pour le Se-82.

Groupe de recherche: Neutrino

Direction: F. PIQUEMAL

Soutenance: Décembre 2018

Xavier RAYMOND

Développement d'une source pulsée d'électrons extraits d'un plasma produit par laser

Groupe de recherche: ENL

Direction: F. GOBET, M. VERSTEEGEN

Soutenance: Septembre 2018

2019

Ricardo PEREZ SANCHEZ

La méthode des réactions de substitution appliquée au ^{240}Pu

Groupe de recherche: ACEN

Direction: B. JURADO

Soutenance: Septembre 2019

Floreille DOMART

Nano-imagerie corrélative de fluorescence X synchrotron et de super résolution des métaux et des protéines dans les synapses de neurones d'hippocampe

Groupe de recherche: ICS

Direction: R. ORTEGA

Soutenance: Octobre 2019

Duy Duc DAO

Corrélations dans les noyaux atomiques dans une approche au-delà du champ moyen avec une interaction réaliste à deux et trois corps

Groupe de recherche: THÉORIE

Direction: L. BONNEAU

Soutenance: Octobre 2019

Nicolas TANG

Évaluation, à partir de modélisations nanodosimétriques, de l'influence de la compaction de la chromatine sur les effets radio-induits précoces et extension aux effets tardifs (réparation des dommages à l'ADN et mort cellulaire).

Groupe de recherche: ICS

Direction: R. ORTEGA

Soutenance: Octobre 2019

Eva TORFEH

Micro-dosimétrie d'irradiations par microfaisceau d'ions par méthodes Monte-Carlo

Groupe de recherche: IRIBIO

Direction: Ph. BARBERET

Soutenance: Octobre 2019

HDR

2015

Philippe BARBERET

Microfaisceaux d'ions appliqués aux sciences du vivant

Groupe de recherche: IRIBIO

Soutenance: Janvier 2015

Beatriz JURADO

The surrogate-reaction method and excitation-energy sorting in nuclear fission

Groupe de recherche: ACEN

Soutenance: Mars 2015

2016

Anselmo MEREGAGLIA

Neutrinos oscillations and theta13 mixing angle measurement

Groupe de recherche: NEUTRINO

Soutenance: Juin 2016

2018

Marianne LEMOINE-GOUMARD

Unveiling Galactic cosmic-ray accelerators with gamma-ray observations: their relation to supernova remnants

Groupe de recherche: ASTROPARTICULES

Soutenance: Juin 2018

2019

Christine MARQUET

La décroissance double bêta et les grandes questions sur le neutrino ; contributions aux expériences NEMO3 et SuperNEMO

Groupe de recherche: NEUTRINO

Soutenance: Juin 2019

Medhi TARISIEN

Physique nucléaire auprès des lasers de puissance

Groupe de recherche: ENL

Soutenance: Septembre 2019

STAGES



2015

Florian SAUBESTRE
09/02/15 au 20/03/15
Groupe ACEN
L. MATHIEU

DUT

Vincent DAUTREMER
Génie Mécanique
20/04/15 au 03/07/15
Bureau d'études mécaniques
F. DELALÉE

Samuel TEXIER
06/02/15 au 20/03/15
ARCAN
H. GUEGAN

Noëlyn FAUSSANE
02/03/15 au 27/07/15
Groupe RADEN
C. SERGEANT

MASTER 1

Baptiste L'HOMEL
02/03/15 au 31/07/15
Groupe ICS
R. ORTEGA

Rachel LACROIX
13/04/15 au 8/09/15
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Vincent BONILLO
15/06/15 au 04/09/15
Groupe Astroparticules
H. LAFFON

Xavier RAYMOND
02/03/15 au 30/06/15
Groupe ENL
F. GOBET | M. VERSTEGEEN

Rayan BAPTISTE
08/04/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH

Mohamed EL HADY
02/03/15 au 29/05/15
Groupe ENL
F. GOBET | M. TARISIEN

Nicolas SENS
08/04/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH

Mathieu QUIRAC
03/03/15 au 30/06/15
Groupe IriBio
C. CHAMPION

Mohamed Salah DJELLALI
04/05/15 au 03/07/15
Groupe Noyaux Exotiques
P. ASCHER

Caroline SCHOU
04/05/15 au 30/09/15
Groupe IriBio
C. MICHELET

Jordan MOLET
07/04/15 au 05/06/15
Plateforme AIFIRA
S. SORIEUL

Thomas LAHENS
11/05/15 au 17/07/15
Groupe ENL
M. TARISIEN

MASTER 2

Guillaume LECOINTRE
09/02/15 au 23/03/15
Groupe Neutrio
F. PERROT

Aloys NIZIGAMA
13/04/15 au 30/06/15
Groupe Théorique
L. BONNEAU

Amar BOUKHARI
06/02/15 au 20/03/15
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Noëlyn FAUSSANE
13/04/15 au 30/06/15
Groupe RADEN
C. SERGEANT

Elodie POUJEAU
06/02/15 au 20/03/15
Groupe ICS
S. ROUDEAU

Rachel LACROIX
13/04/15 au 04/09/15
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Felix MARTIN
06/02/15 au 20/03/15
Groupe ICS
S. ROUDEAU

Xavier RAYMOND
Groupe ENL
F. GOBET

Ngoc Duy TRINH
06/02/15 au 20/03/15
Plateforme PRISNA
H. CHIRON

Mathieu QUIRAC
03/03/15 au 30/06/15
Groupe IriBio
C. CHAMPION

Idir BELAID
06/02/15 au 20/03/15
Groupe ACEN
L. MATHIEU

Claire MICHELET
04/05/15 au 30/09/15
Groupe IriBio
C. MICHELET

LICENCE 1

Manon QUIROS
15/06/15 au 17/07/15
Groupe Théorique
L. BONNEAU

LICENCE 3

Mohamed BARADAT
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Florian BATTISTON
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Geoffrey BONAMY
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Medhy BOUAKKAZ
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Dorsaf CHERIF
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Jordan HERAUD
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Marie GUIONIE
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Axel PIN
18/03/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Gonçalo PALHINHA
CASTILLO
11/05/15 au 26/05/15
Groupe ACEN
B. JURADO

Temoehaa HOKUIN
18/05/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
Th. REPOSEUR

Guilhem ROMO
12/05/15 au 26/05/15
Groupe IriBio
C. CHAMPION

Gabriel DETRAZ
18/05/15 au 19/06/15
Groupe Astroparticules
D. SMITH | D. DUMORA

Valentin FONDEMENT
14/12/15 au 14/12/15
Groupe ENL
F. HANNACHI

AUTRES NIVEAUX

Bastien DANJOU
BTS IMP 1^{ère}
04/05/15 au 26/06/15
Bureau d'études mécaniques
F. DELALÉE

Corentin DESMOULIN
BAC Pro TU 1^{ère}
30/11/15 au 16/12/15
Bureau d'études mécaniques
F. DELALÉE

Découverte 3ème

02 au 6/02/15
Guillaume DAMAS

9 au 13/02/15
Clément DEVERT
Erwan QUINOT
Arthur NOT
Thomas ALARCON

23 au 27/02/15
Antoine CAZANAVE

16 au 20/03/15
Valentine ROSSET
Quentin LE CORRE
Vincent MOREAU-EYMERY
Melvyn NOUAILLE

2 au 6/11/15
Adrien GUYOT

30/11 au 4/12/15
Max SENRENS-MAUNY
Gabriel MOUTON
Clémence DOSSIER

14 au 18/12/1
Léa GRIMAUD
Paul RUELOUX
Quentin CADOU
Léo BARAT
Pauline FLORSCH

2016**DUT**

Hao ZHOU
Génie Biologique
01/02/16 au 15/07/16
Groupe IriBio
R. ORTEGA

Lucas AYMARD
Génie Mécanique
11/04/16 au 24/06/16
Bureau d'études mécaniques
F. DELALÉE

MASTER 1

Axel PIN
11/04/16 au 10/06/16
Groupe Neutrino
E. CHAUVEAU

Guillaume FOLLET
11/04/16 au 10/06/16
Groupe Neutrino
E. CHAUVEAU

Hassan LAASRI
11/04/16 au 10/06/16
Groupe Neutrino
G. CANCHEL

Nicolas SENS
11/04/16 au 10/06/16
Groupe IriBio
C. CHAMPION

Joël QUICRAY
11/04/16 au 10/06/16
Groupe IriBio
C. CHAMPION

Edwige DAMMAN
12/04/16 au 14/06/16
Plateforme PRISNA
H. CHIRON

Hugo LAURENT
18/04/16 au 17/06/16
Groupe ACEN
Y. TSEKHANOVICH

Alexandre VIGNAUX
11/04/16 au 10/06/16
Groupe ENL
M. VERSTEEGEN

Roberto DE STEFANO
02/05/16 au 22/07/16
Groupe ENL
F. HANNACHI

Imen CHEBIL
02/05/16 au 09/09/16
Groupe IriBio
C. MICHELET

Camille BOSSAVIT
17/05/16 au 17/06/16
Plateforme AIFIRA
S. SORIEUL

MASTER 2

Marine PIROLLEY
08/02/16 au 22/03/16
Groupe IriBio
S. ROUDEAU

Jules SAUVEROCHE
08/02/16 au 22/03/16
Groupe Théorique
L. BONNEAU

Quentin GLOAGUEN
08/02/16 au 22/03/16
Service Instrumentation
L. SERANI

David CHABRIER
08/02/16 au 22/03/16
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Tiffany RIOU
08/02/16 au 22/03/16
ARCANE

Maxime HUGUET
29/02/16 au 24/06/16
Groupe Théorique
L. BONNEAU

LICENCE 2

Léa FOURNASSON
10/05/16 au 13/05/16
Groupe Astroparticules
T. REPOSEUR

Steven ROBIN
10/05/16 au 03/06/16
Groupe Astroparticules
T. REPOSEUR

LICENCE 3

Florian KERUZORE
09/05/16 au 24/06/16
Groupe ACEN
B. JURADO

Sebastian VAN BILSEN
09/05/16 au 01/07/16
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Louis CASSANY
09/05/16 au 01/07/16
Groupe RADEN
B. THOMAS

Maxime VILLADARY
09/05/16 au 10/06/16
Groupe Astroparticules
B. LOTT

Romain NAVARRON
02/05/16 au 09/06/16
Groupe Théorique
N. SMIRNOVA

Louis LALANNE
09/05/16 au 22/07/16
Groupe Noyaux Exotiques
B. BLANK

Paul QUINOMAN
02/05/16 au 29/06/16
Groupe IriBio
C. CHAMPION

AUTRES NIVEAUX

Valentin ROUSSEL
BAC STL
11/04/16 au 01/07/16
Groupe Neutrino
C. CERNA

Léo APARISI DE LANNOY
Diplôme de l'ENS
27/06/16 au 22/07/16
Groupe ENL
M. TARISIEN

Gwénolé CHAQUIN
BAC Pro SEN
14/11/16 au 09/12/16
Plateforme PRISNA
H. CHIRON

Découverte 3ème

04 au 08/01/16
Alexandre DE TEGGLASY

18 au 22/01/16
Anton LOOT - Samuel
RODRIGUES Frédéric BERTIN
Emilien DEWILDE
Quentin NOGUEIRA

08 au 12/02/16
Jérémy DEGORCE-DUMAS
Sasha GATTEFOSSE
Victor PICHON

14 au 18/03/16
Alexandre VINAS
Nathan BARLET
Timothé LABASSA
Yann DOSSOU-YOVO

10 au 14/10/16
Romain ELIOT
Jules BENET

21 au 25/11/16
Hugo ALVES
Pierre QUEMARD
Pierre Olivier LOUCHE
Sydney THIEBLEMONT

28 au 02/12/16
Théo LABOURBE
Marie DOMOISON
Charline LAVIE

05 au 09/12/16
Noah Luc SIMON
Yanis CAILLON
Thomas NAUDIN

12 au 16/12/16
Julien LABADIE
Mathis CAZEAX
Cloé DRUILLOLE
Adélie BRETON
Coralie SOURGEN
Clément MELLE
Augustin ANGAUD

2017**DUT**

Hugo DARDY
Génie Mécanique
18/0/17 au 30/06/17
Bureau d'études mécaniques
A. FOURNIER

Maelle DARNAUD
Génie Électronique Informatique
Industrielle
18/04/17 au 30/06/17
Electronique
P. HELLMUTH

MASTER 1

Nour TABCEH
24/04/17 au 22/06/17
Groupe Astroparticules
F. BRUN

Adrien SOLACROUP
24/04/17 au 22/06/17
Groupe ENL
M. TARIEN

Mathieu ORGAN
18/04/17 au 28/07/17
21/08/17 au 31/08/17
Service Instrumentation
B. THOMAS

Bastien POIRET
2/05/17 au 21/07/17
Groupe RADEN
D. HORLAIT

Nada CHOUAYAKH
29/05/17 au 28/07/17
Groupe Neutrino
M. PRAVIOFF

Hanna CHARTIER
24/04/17 au 22/06/17
Groupe ENL
M. VERSTEEGEN

Ghita ZIATNI
6/06/17 au 31/08/17
Service Instrumentation
B. THOMAS

Mathieu PERET
24/04/17 au 22/06/17
Groupe IriBio
C. CHAMPION

Paul QUINOMAN
24/04/17 au 22/06/17
Groupe ENL
M. VERSTEEGEN

MASTER 2

Aymeric FERREIRA
6/02/17 au 6/08/17
Groupe IriBio
C. CHAMPION

Claire LARTIGUE
01/02/17 au 23/06/17
Groupe RADEN
C. SERGEANT

Zhuxin LI
6/03/17 au 28/07/17
21/08/17 au 15/09/17
Groupe IriBio
C. MICHELET

Axel PIN
6/03/17 au 16/06/17
Groupe Neutrino
C. MARQUET

Nicolas SENS
6/03/17 au 16/06/17
Groupe Neutrino
F. PERROT

Florent VILOTTE
2/01/17 au 30/06/17
Groupe IriBio
H. SEZNEC

Ryan BAPTISTE
6/03/17 au 16/06/17
Groupe ACEN
I. TSEKHANOVICH

Yihong LI
22/05/17 au 24/11/17
Groupe ACEN
I. TSEKHANOVICH

Hugo DEBERGE
2/01/17 au 30/03/17
Service Instrumentation
B. THOMAS

Maxime ATGIE
2/06/17 au 30/03/17
Service Instrumentation
B. THOMAS

Edwige DAMMAN
13/02/17 au 31/03/17
Groupe ACEN
L. MATHIEU

Clara GRIT
13/02/17 au 31/03/17
Groupe ICS
S. ROUDEAU

Manuel LAMOUREUX
13/02/17 au 31/03/17
Groupe ACEN
L. MATHIEU

LICENCE 1

Christophe CHARLEMAGNE
7/11/17 au 20/12/17
Groupe Neutrino
C. MARQUET

LICENCE 3

Simon DELCAMP
02/05/17 au 16/06/17
Groupe ENL
M. TARIEN

Teddy DURAND
10/04/17 au 21/04/17
Groupe Théorique
Ph. QUENTIN

Pierre BONNET
10/04/17 au 21/04/17
Groupe Théorique
Ph. QUENTIN

Evann CLAVIER
10/04/17 au 21/04/17
Groupe Théorique
Ph. QUENTIN

Anthony DAVID
9/05/17 au 16/06/17
Groupe Théorique
L. BONNEAU

Valéry DESBORDES
9/05/17 au 16/06/17
Groupe Théorique
L. BONNEAU

Simon DUPOURQUÉ
9/05/17 au 16/06/17
Groupe Théorique
L. BONNEAU

Sylvain CUZACQ
2/05/17 au 9/06/17
Groupe Astroparticules
D. SMITH

Mariama SAO
9/05/17 au 30/06/17
Groupe IRI BIO
Ph. BARBERET

Hassan MOUSSAWI
2/05/17 au 4/07/17
Groupe Neutrino
F. PERROT

Samy LABSIR
15/05/17 au 16/06/17
Groupe ACEN
B. JURADO

Jérémy RIOU
2/05/17 au 30/06/17
Groupe Neutrino
F. PERROT

Morganne DOMENGE
10/07/17 au 31/07/17
Service Instrumentation
Ph. ALFAURT

AUTRES NIVEAUX

Gwénolé CHAQUIN
BAC Pro SEN 1^{ère}
13/03/17 au 07/04/17
Service Informatique
I. MOREAU

Gwénolé CHAQUIN
BAC Pro SEN 2^{ème}
25/09/17 au 21/10/17
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

Raphaël BOUET
TSSNEC1
22/05/17 au 30/06/17
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

Léo MERLE
BAC Pro TU 1^{ère}
27/11/17 au 22/12/17
Atelier Mécanique
A. TEMPEL

Découverte 3ème

30/01 au 03/02/17
Aurélien LEBLANC
Alexandre DUTIL
Armand GALIMARD
Thomas CHAMBON

13 au 17/02/17
Martin MAZERON
Pierre FROMENTIN
Louis MOORHOUSE
Candice REY
Emilien COTRAIT
Evan COSSON

2018

MASTER 1

Hugo DEBERGE
2/01/18 au 30/03/18
Service Instrumentation
B. THOMAS

Maxime ATGIE
2/01/18 au 30/03/18
Service Instrumentation
B. THOMAS

Cédric KOUDJO
16/04/18 au 22/06/18
Groupe Théorique
N. SMIRNOVA

Eva TORFEH
1/06/11 au 27/07/18
Groupe IriBio
E. TORFEH

MASTER 2

Arnaud-Rémi MARES
12/03/18 au 14/06/18
Groupe Astroparticules
M. LEMOINE-GOUMARD

Reza KHOSHTINAT NIKKOUY
12/03/18 au 15/06/18
Groupe Noyaux Exotiques
M. GERBAUX

Victor LE LAUSQUE
12/03/18 au 30/03/18
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Victor LE LAUSQUE
12/03/18 au 30/03/18
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Nicolas DUFOUR
12/02/18 au 30/03/18
Service Instrumentation
H. CHIRON

Mathieu ORGAN
12/02/18 au 30/03/18
Groupe ACEN
L. MATHIEU

Charles HELAINE
12/02/18 au 30/03/18
Cellule ARCAN
H. GUÉGAN

LICENCE 2

Clément LACOSTE
21/05/18 au 29/07/18
Groupe Astroparticules
D. DUMORA

LICENCE 3

Abdel Kamel BENMAHI
2/05/18 au 27/06/18
Atelier Mécanique
E. GILABERT

Maele PECHOIN
2/01/18 au 30/03/18
Groupe Neutrino
C. JOLLET

Raphael GAZZINI
22/05/18 au 22/06/18
Groupe ENL
M. TARISIEN

Aline RABOISSON
22/05/18 au 22/06/18
Groupe ENL
J. HENARES

AUTRES NIVEAUX

Léo MERLE
BAC Pro TU 1^{ère}
19/03/18 au 06/04/18
23/04/18 au 04/05/18
Atelier Mécanique
A. TEMPEL

Wen YANG
Ingénieur généraliste IMT Atlantique
1/03/18 au 14/09/18
Groupe IriBio
C. MICHELET

Mathis GANCEL
Prépa INP
20/04/18 au 15/06/18
Groupe Astroparticules
B. LOTT

Mathias DUPRAT
Seconde
18/06/18 au 22/06/18
Service Instrumentation
Ph. ALFAURT

Iban CASSAN DE GOROSTARZU
Seconde
18/06/18 au 22/06/18
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

Iban CASSAN DE GOROSTARZU
Seconde
18/06/18 au 22/06/18
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

Geoffray BORAS-DELATRE
Seconde
18/06/18 au 22/06/18
Groupe Neutrino
E. CHAUVEAU

Oleg KLOCHKO
Seconde
16/07/18 au 23/07/18
22/10/11 au 26/10/18
Groupe Théorique
N. SMIRNOVA

Thierno BALDE
CAP
5/11/18 au 16/11/18
10/12/18 au 20/12/18
28/01/11 au 8/02/18
Service Campus
M. KUNZ

Lucas MENAULT
BAC Pro TU 1^{ère}
26/11/11 au 21/12/18
Bureau d'études mécaniques
M. ROCHE

2019

DUT

Thomas VACHER
3/04/19 au 19/06/19
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

MASTER 1

Pierre HERRAN
15/04/19 au 26/07/19
Groupe IriBio
Ph. BARBERET

Charles LEBRUN
7/01/19 au 8/03/19
Service Instrumentation
Ph. ALFAURT

Maele PECHOIN
6/05/19 AU 27/06/19
Groupe Neutrino
M. PRAVIOFF

Mohamed BENYAKHLEF
6/05/19 AU 27/06/19
Groupe Neutrino
A. PIN

Léo PLAGNOL
8/04/19 au 23/08/19
Groupe Noyaux Exotiques
M. GERBAUX

Amaury SACRISTE
29/04/19 au 27/06/19
Groupe Noyaux Exotiques
M. VERSTEEGEN

Jeremy SARRADE
27/05/19 au 20/07/19
Groupe IriBio
F. GOBET

MASTER 2

Guillaume HOLUB
14/01/1Ç au 12/07/19
Groupe RADEN
C. SERGEANT

Quentin LAINÉ
18/03/19 et 19/07/19
Groupe ACEN
B. JURADO

Tom DESDOITS
18/02/19 au 29/03/19
Groupe Neutrino
F. PERROT

Arthur THALLER
11/03/19 au 12/07/19
Groupe Théorique
N. SMIRNOVA

Valery DESBORDES
18/03/19 au 21/06/19
Groupe Neutrino
C. JOLLET

LICENCE 2

Thomas MULLER
10/06/19 au 12/09/19
Groupe Astroparticule
M. LEMOINE-GOUMARD

Thibault BERNARD
10/06/19 au 12/07/19
Groupe Astroparticule
M. LEMOINE-GOUMARD

Clément LACOSTE
20/05/19 au 28/06/19
Groupe Noyaux Exotiques
M. GERBAUX

Justine MARQUET
24/06/19 au 19/07/19
Groupe Astroparticules
D. DUMROA

LICENCE 3

Aliche TAOUS
21/10/19 au 10/01/20
Groupe Neutrino
F. PERROT

Elsa DUPIN
6/05/19 au 5/07/19
Groupe NEX
M. VERSTEEGEN

Hugo REY MESADO
6/05/19 au 21/06/19
Laboratoire commun P2R
Th. LENOBLET

Alexandre RINTAUD
15/04/19 au 19/04/19
Groupe IRI BIO
Ph. BARBERET

Ilyès JALISSE
2/05/19 au 21/06/19
Groupe Théorique
L. BONNEAU

Ilyès JALISSE
2/05/19 au 21/06/19
Groupe Théorique
L. BONNEAU

Moussa SANE
7/05/19 à mi-juin
Groupe Neutrino
C. JOLLET

Niels NEUWMUNSTER
2/05/19 au 14/06/19
Groupe Astroparticules
Th. REPOSEUR

Antoine MEYER
2/05/19 au 14/06/19
Groupe Astroparticules
Th. REPOSEUR

Quentin DELIGNAC
6/05/19 au 21/06/19
Groupe Théorique
N. SMIRNOVA

Marc DOUBLET
6/05/19 au 5/07/19
Groupe Théorique
N. SMIRNOVA

Jessica SANSON
6/05/19 au 9/07/19
Service Instrumentation
B. THOMAS

AUTRES NIVEAUX

Raphaël BOUET
Licence Pro
11/02/19 AU 7/06/19
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

Enzo ANTUORO
BAC Pro MELEC
4/03/19 au 29/03/19
Service Instrumentation
Ph. ALFAURT

Romain PUIROUX
BAC Pro MELEC
4/03/19 au 29/03/19
Service Instrumentation
Ph. ALFAURT

Achille CAILLAUD VIGIER
Seconde
13/05/19 au 24/05/19
Groupe Neutrino
E. CHAUVEAU

Quentin BILLARD
3^{ème}
15/04/19 au 17/04/19
Service Électronique
P. HELLMUTH

Mathieu CORNE
1^{ère}
27/05/19 au 3/07/19
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

Guillaume DAMAS
BTS CPI 1^{ère} année
27/05/19 au 3/07/19
Bureau d'études mécaniques
M. ROCHE

Thierno BALDE
CAP
29/04/19 au 17/05/19
29/09/19 au 11/10/19
Bureau d'études mécaniques
M. ROCHE

Raphaëlle GUYOT
Seconde
17/06/19 au 21/06/19
Plateforme PRISNA
H. CHIRON

Laurine CASSAGNE
Seconde
1/07/19 au 5/07/19
Groupe Neutrino
M. PRAVIOFF

Tom MALEPLATE
Seconde
24/06/19 au 28/06/19
Groupe Neutrino
F. PIQUEMAL

Mathis GIORDANO
Seconde
24/06/19 au 28/06/19
Service Électronique
F. DRUILLLOLE

VIE ET FONCTIONNEMENT

DU LABORATOIRE

218	Organisation et ressources
222	Hygiène et sécurité
224	Communication
232	Formation permanente
234	Cellule de valorisation & transfert de technologie
236	Séminaires
242	Effectifs du CENBG
243	Visiteurs

ORGANISATION | RESSOURCES

1

ORGANISATION

L'organisation du laboratoire est structurée autour de l'équipe de direction, du conseil du laboratoire, des équipes de recherche et des services techniques et administratifs.

Les activités du laboratoire, en grande partie expérimentales, s'organisent autour de projets de recherche participant aussi bien d'une structuration scientifique en réseaux de laboratoires IN2P3 dans le cadre de grands projets internationaux et sur les axes au cœur de la discipline, que d'une politique de site, souvent interdisciplinaire et fortement ancrée localement. La structuration en équipes de recherche et services techniques organisés répond à cette dualité. L'ensemble est complété par 3 plates-formes : AIFIRA, PRISNA et PIAGARA qui viennent en soutien non seulement aux projets du laboratoire mais accueillant également des équipes de laboratoires aquitains, français et européens.

Comme indiqué dans le rapport d'activité précédent, l'organisation du laboratoire est orientée en mode gestion de projet. L'examen des nouveaux projets et leur suivi ultérieur est réalisé par un conseil scientifique qui se réunit en moyenne deux fois par an. De 2015 à 2019, ont été examinés les projets « E-UNIVERSE » et les activités au JAEA du groupe ACEN, « JUNO, R&D - R2D2 et LIQUIDO » du groupe NEUTRINO, « WISARD » du groupe NEX, ainsi que PRISNA Prestations, ARCANÉ et les plateformes PRISNA et AIFIRA. En 2019, le conseil scientifique de laboratoire a changé de composition. Lors de la première rencontre avec les nouveaux membres du Conseil Scientifique, l'ensemble des groupes et services du laboratoire se sont présentés.

Comme dans toutes les UMR, un conseil de laboratoire composé pour moitié d'élus et pour moitié de membres nommés traite des

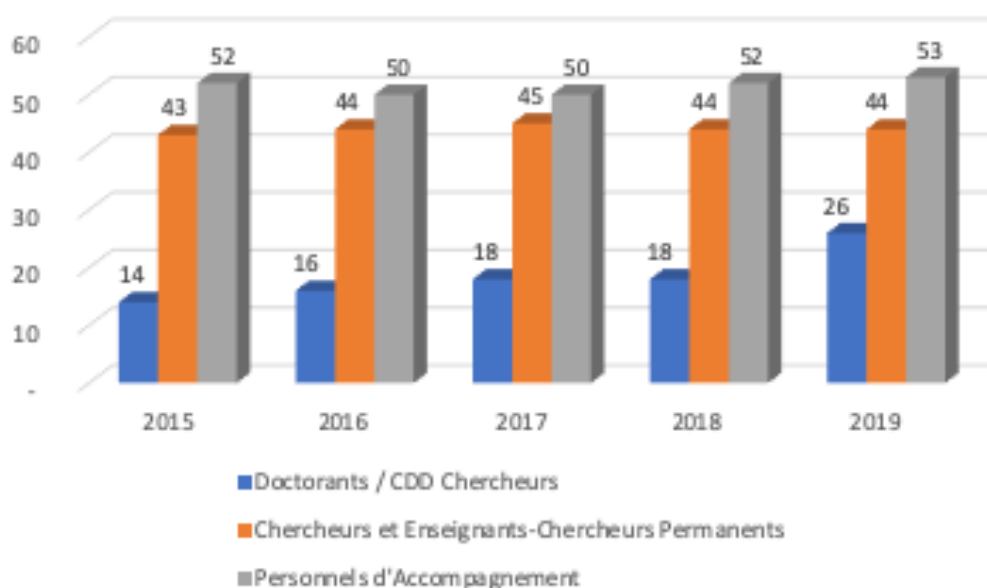
sujets touchant à l'organisation générale du laboratoire. Il se réunit environ une dizaine de fois par an. Des réunions de chefs de groupes et de services sont également organisées régulièrement notamment pour présenter les demandes annuelles de budget et ressources humaines, pour préparer les EAOMs, pour un échange d'informations et de points de vue ou pour évoquer des problématiques particulières.

En plus des instances statutaires obligatoires, le CENBG dispose d'une commission hygiène et sécurité qui réunit des élus et l'ensemble des personnes en charge, au laboratoire (assistants de prévention, PCR, Service campus, service administratif) et au niveau des tutelles (IN2P3, DR15 et Université). Les actions de communication sont importantes au laboratoire et la cellule communication du laboratoire est fréquemment sollicitée pour l'organisation d'événements, manifestations diverses (50 ans du laboratoire, journée portes-ouvertes, etc...). En 2018, une gestionnaire financière a changé de fonctions pour passer "chargée de communication" afin de répondre pleinement aux besoins du laboratoire.

Enfin, toutes les semaines, un comité de direction composé du Directeur d'unité, du Directeur Adjoint, du Directeur Technique et du Directeur Administratif s'est mis en place jusqu'en 2018. Puis, lors de la nomination du nouveau directeur, un nouveau comité de direction a vu le jour, et continue à se réunir toutes les semaines. Il est composé du Directeur de l'Unité, du Directeur Technique et du Directeur Administratif. Il est ouvert une fois sur deux aux Responsables de pôles de recherche et au Directeur Adjoint. Les aspects financiers, promotions des agents, stratégie du laboratoire, etc.. y sont abordés.

En matière de qualité, des actions importantes ont été menées au cours de ces années 2015-2019, entre autres sur PRISNA. En effet, dans le cadre des mesures de radioactivité gérées par PRISNA Prestation, l'accréditation COFRAC a été obtenue début 2013, puis renouvelée avec succès depuis.

Evolution du personnel du laboratoire par catégorie



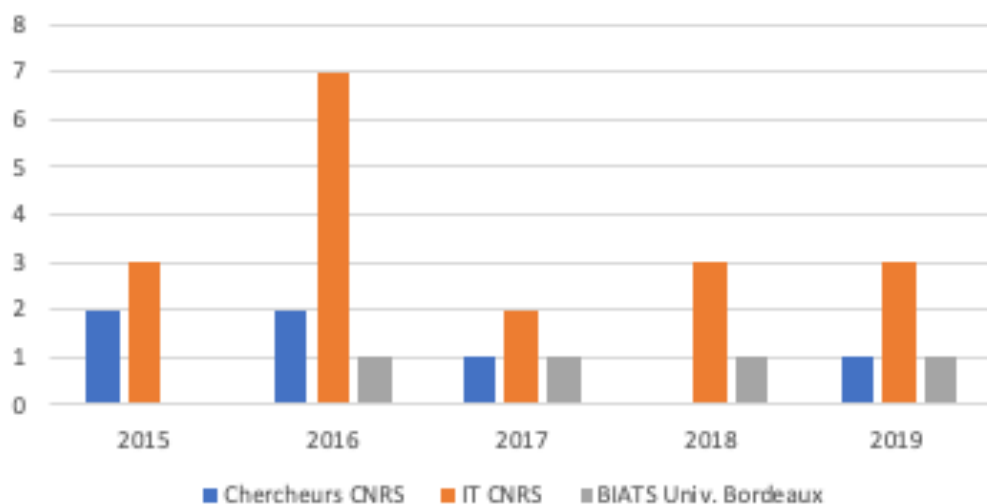
Au 31 décembre 2019, le CENBG compte 123 personnels dont 27 chercheurs (dont 1 émérite et 2 chercheurs bénévoles), 19 enseignants chercheurs (dont 1 émérite), 26 doctorants et CDD chercheurs, 40 ITA CNRS, 8 BIATS UBx ainsi que les 3 Ingénieurs/technicien de la cellule de transfert ARCANE. Par ailleurs, le laboratoire accueille tous les ans une quarantaine de stagiaires (des stages découvertes de troisièmes jusqu'au Master) pour des périodes allant jusqu'à 6 mois.

Parmi les spécificités du laboratoire dans le panorama des UMR locales, on peut remarquer qu'une grande partie des personnels techniques et administratifs vient du CNRS. Le personnel IT est réparti entre les équipes de recherche et les services, suivant la politique scientifique des équipes. La complexité de nos réalisations justifie un soutien important d'ingénieurs et de techniciens de haut niveau, c'est une caractéristique IN2P3. Le rôle de tous les ITs CNRS et Universitaires est d'apporter un soutien et un support aux chercheurs et enseignants chercheurs de l'Unité. Il en est de même

pour le service administratif dont le rôle est capital pour faire face aux règles administratives et financières nationales et européennes. Le soutien des tutelles a permis le maintien de l'effectif des permanents malgré des départs à la retraite ou par voie de mutation. Actuellement, la situation reste saine. Notons que le nombre de CDD est en augmentation assez nette en 2019 du fait de l'arrivée de plusieurs CDD chercheurs (8 pour l'année 2019). Entre 2015 et 2019, le laboratoire a obtenu 6 financements de thèse de l'Université, 2 bourses IDEX en co-tutelle avec des universités étrangères et un co-financement de thèse de la Région (co-financée par le CNRS). Sur cette même période, le laboratoire a obtenu également 9 bourses de thèse venant du CNRS et de l'IN2P3.

Un autre point important du CENBG, c'est l'importance qu'attache le laboratoire aux promotions de ses agents. Tous les ans, les campagnes d'avancement des ITs CNRS sont rigoureuses et les dossiers les plus « murs » et méritants sont avancés par la direction. Il en est de même pour les BIATSS de l'Université de Bordeaux, beaucoup moins nombreux au laboratoire, et dont les possibilités de promotion sont bien plus rares. De plus, et tous les ans également, des « jurys blancs » se forment au laboratoire pour aider et préparer les candidats aux concours interne. Les résultats sont plutôt satisfaisant comme en témoigne le graphique ci-dessous.

Promotions des agents du CENBG



Les ressources du CENBG sont apportées par ses tutelles CNRS et le département Sciences de la matière et du rayonnement (anciennement département Sciences & Technologies de l'Université de Bordeaux) ainsi que des ressources propres pour un total moyen de 1,8 M€ HT par an.

La dotation de fonctionnement, équipement, investissement (FEI) ou soutien de base abondée à la fois par le CNRS-IN2P3 et l'Université représente plus de 20 % du budget annuel. La part de l'Université prend en compte l'infrastructure et une partie des

fluides. Le CNRSIN2P3 notifie également une part importante de sa subvention fléchée sur projets, entre 17 et 25 % du budget total du laboratoire en fonction des projets dans lesquels le CENG est impliqué.

Le budget sur Subvention d'Etat du CENBG provient donc du CNRS et de l'Université de Bordeaux avec une affectation sur différentes lignes :

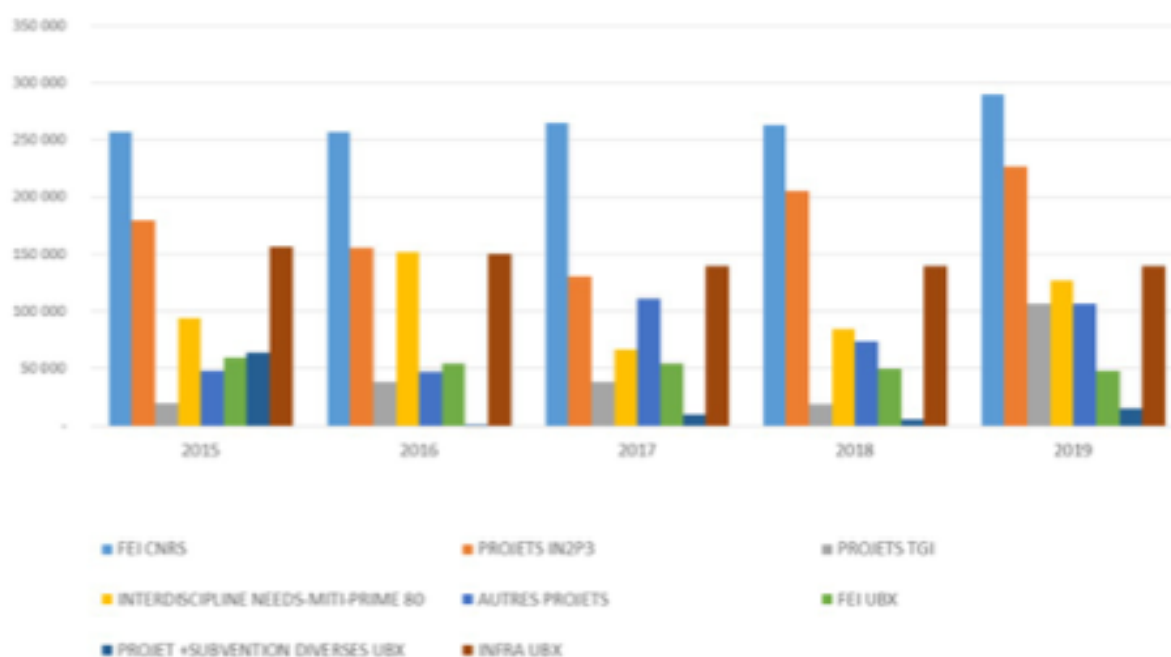
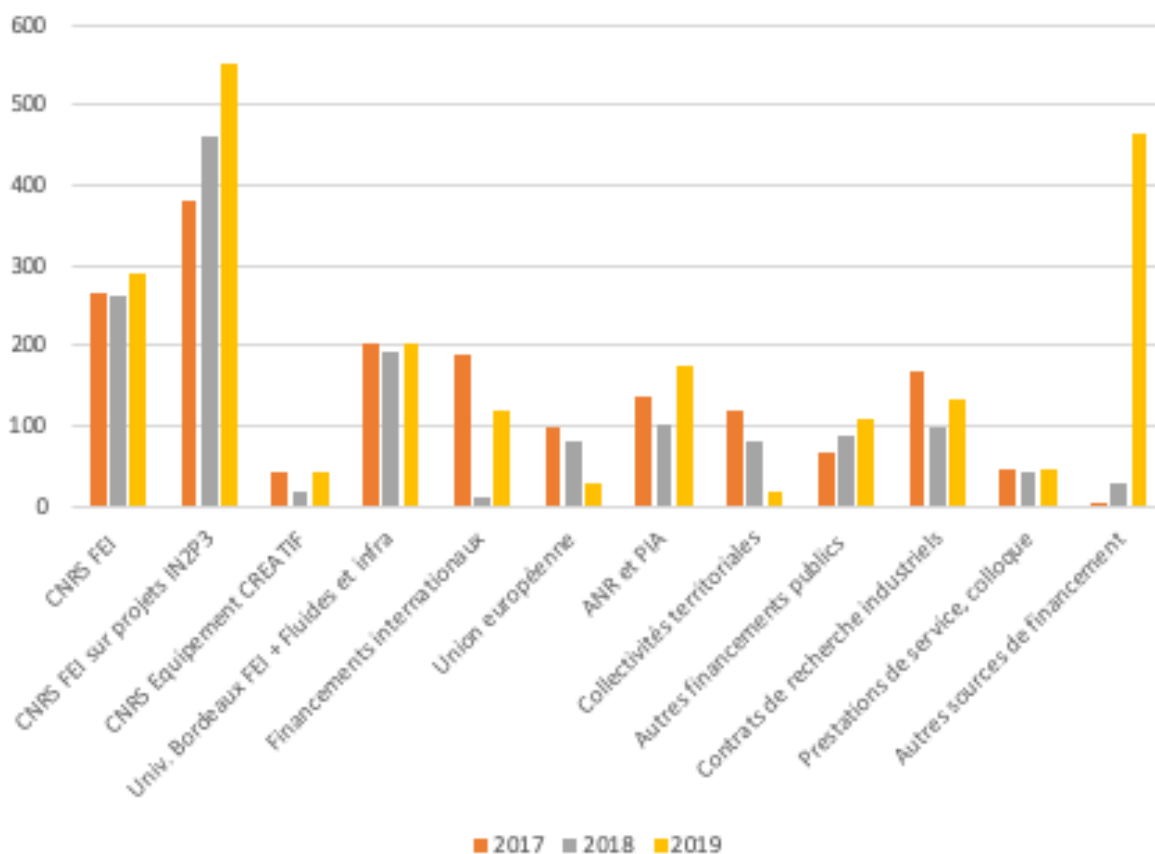
- Le Soutien de Base Non Affecté pour le fonctionnement de l'unité (FEI CNRS et Université)
- Les frais d'infrastructures incluant les fluides et les interventions de maintenance sur le site (Infra UBx)
- Le soutien aux projets (projets IN2P3, Projets et Subventions Université via département SMR)

Le reste du budget est assuré par des subventions sur programmes de recherche : ANR, Région Aquitaine, Europe et contrats divers recherche et transfert de technologie. Ces ressources sont fluctuantes en fonction des contrats obtenus avec une baisse significative en 2018 liée à une baisse des financements ANR et européens. L'année 2019 présente une forte augmentation du fait du provisionnement du financement du blindage de SuperNEMO avec des contributions de l'IN2P3 et de partenaires étrangers. Le laboratoire doit s'investir plus dans les années à venir sur les ANR, programmes européens et appels Région afin d'augmenter ses

ressources pour les projets et les plateformes. Pour cela, et afin de soutenir au mieux les chercheurs du laboratoire dans les réponses aux AAP, une veille sur ces AAP est en cours de réalisation par le service administratif et nous espérons pouvoir mettre ceci en place dans les prochains mois.

Enfin, la gestion de ces ressources est réalisée entièrement par le CNRS dans le cadre d'une Délégation Globale de Gestion installée depuis 2011.

Crédits notifiés en 2017, 2018 et 2019

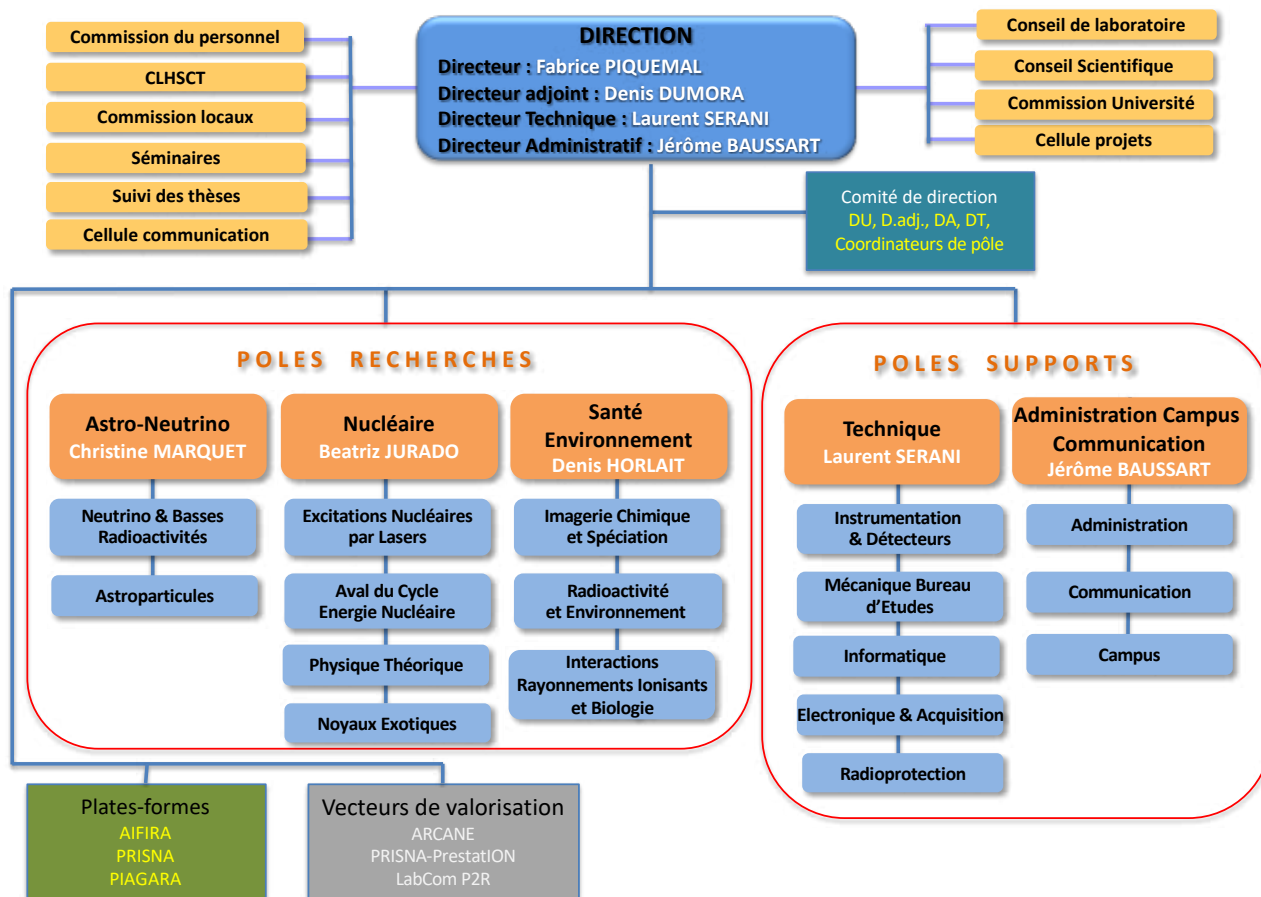


Répartition des crédits sur Subvention d'Etat du CNRS et de l'Université.

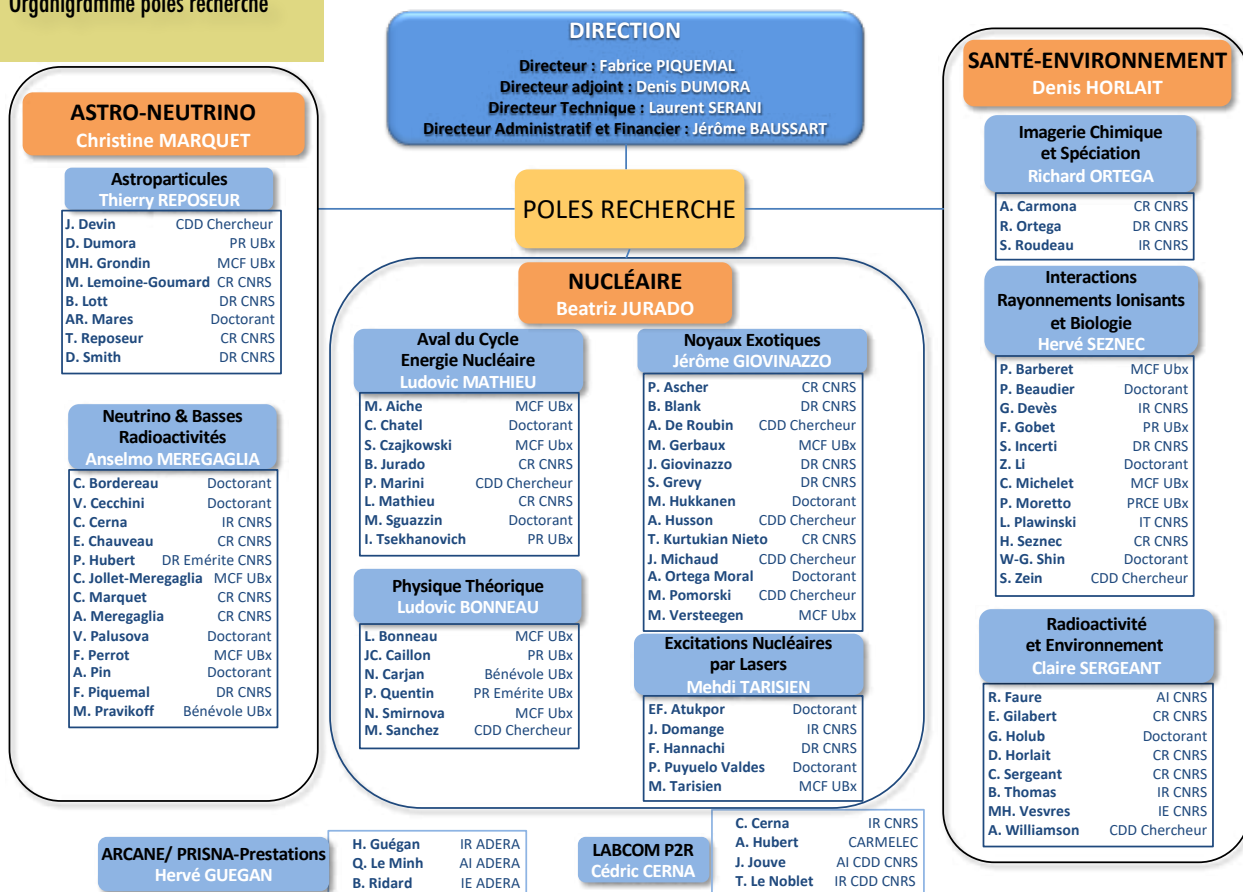
Responsabilités des agents du CENBG auprès de l'Université de Bordeaux et du CNRS

Beatriz JURADO	Membre du comité national Section 01 du Comité National
Christophe CHAMPION	M1 Parcours Physique Fondamentale
Claire MICHELET	Parcours Instrumentation Nucléaire
Denis DUMORA	Mention Master Physique à l'université de Bordeaux
Denis DUMORA	Mention Master Physique Fondamentale et Application à l'université de Bordeaux
Fabrice PIQUEMAL	Membre du comité national section 01
Fazia HANNACHI	Directrice adjointe Département SMR de l'Université de Bordeaux
Fazia HANNACHI	Conseil du Département Science et technologie de l'Université de Bordeaux
Franck GOBET	Directeur Ecole doctorale Sciences Physiques et de l'Ingénieur
Frédéric PERROT	Membre CNU section 29
Gérard CLAVERIE	Membre du Comité central d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail du CNRS
Igor TSEKHANOVICH	Membre CNU Section 29
Jean-Christophe CAILLON	Master métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation
Marie-Hélène GRONDIN	M1 Parcours Physique Fondamentale
Maud VERSTEEGEN	Parcours Instrumentation Nucléaire
Maud VERSTEEGEN	Master métiers de l'enseignement, de l'éducation et de la formation
Philippe BARBERET	Cursus Master Instrumentation
Philippe BARBERET	CMI Rayonnement et instrumentation
Philippe MORETTO	Parcours Instrumentation Nucléaire
Philippe MORETTO	Vice Président Recherche de l'Université de Bordeaux
Philippe QUENTIN	Parcours Physique Nucléaire et Applications délocalisé à Hanoï
Sébastien INCERTI	Membre du comité national Section 01
Sébastien INCERTI	DAS interdisciplinaire IN2P3
Claire MICHELET	Membre élu au Conseil du Département Sciences de la matière et du rayonnement
Mourad Aïche	Membre élu au Conseil du Département Sciences de la matière et du rayonnement

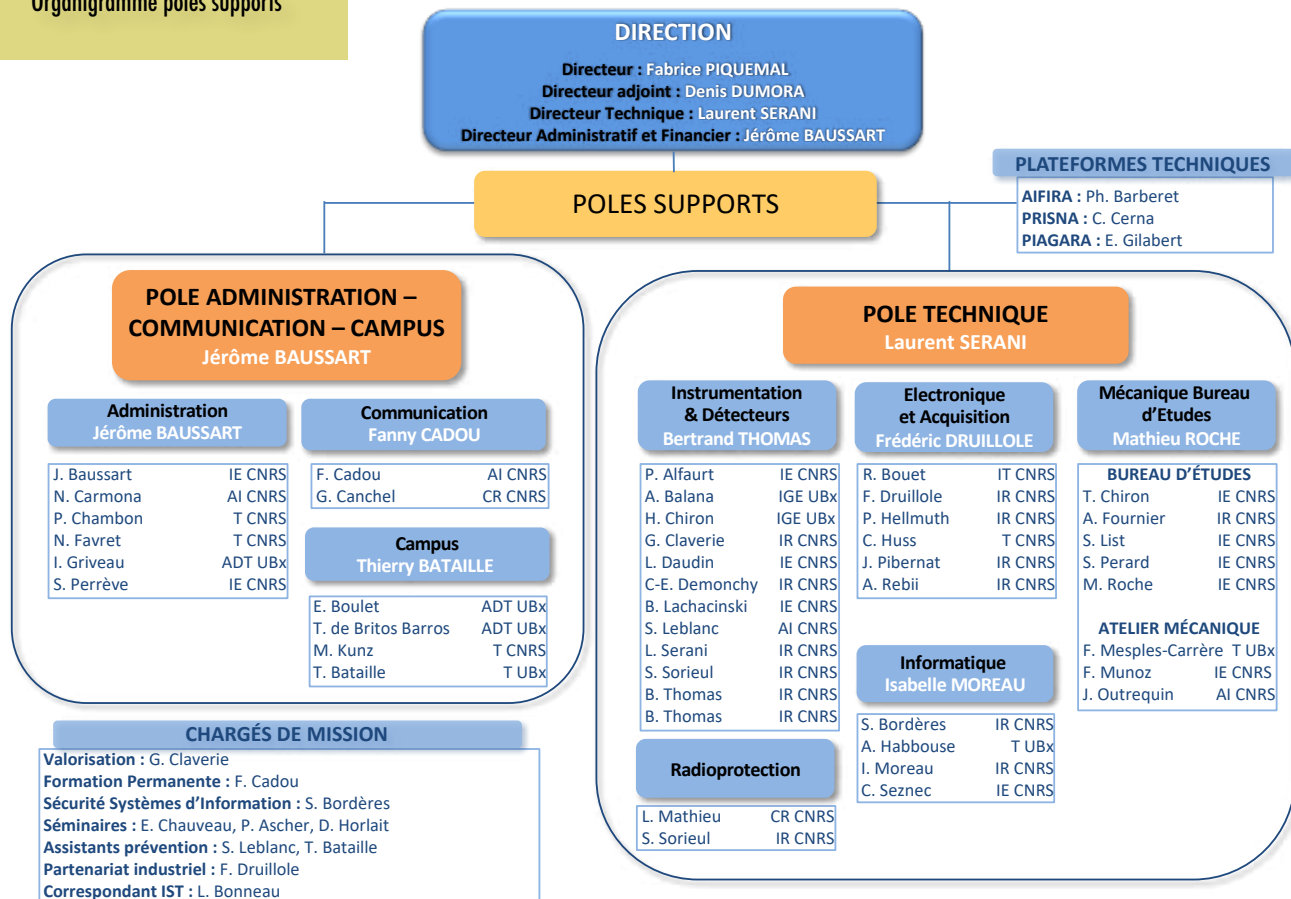
Organigramme générale



Organigramme pôles recherche



Organigramme pôles supports



HYGIÈNE ET SÉCURITÉ

En raison d'un spectre large d'activités de recherche, le CENBG se conforme à une réglementation qui couvre des domaines très divers, allant du risque biologique jusqu'aux rayonnements ionisants en passant les risques chimiques, les nanomatériaux, les matériels sous pression et plus récemment les gaz menant à des produits de dégradation potentiellement toxiques. Beaucoup de ces activités et installations font l'objet d'autorisations délivrées par des autorités administratives comme l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), la Préfecture de la Gironde ou encore la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL).

De gros efforts ont été consentis au cours des dernières années d'une part pour s'adapter à l'évolution de la réglementation et d'autre part pour résorber certaines non-conformités, souvent dues à une infrastructure vieillissante ou à l'historique du laboratoire. La plupart de ces actions se font grâce à la forte implication du service Campus du CENBG qui assume la réalisation ou le suivi des travaux. Certaines actions spécifiques se font grâce à l'implication des chercheurs eux-mêmes, par exemple en biologie pour l'autorisation de manipulation des OGM ou la mise en place d'un laboratoire de type L2.



©Andrei SLOBTSOV from Unsplash

- Organisation d'au moins deux CHS chaque année.
- Accueil des nouveaux entrants et sensibilisation aux différents types de risques. (+ Utilisation de la plateforme pédagogique NEO)
- Planification et suivi des contrôles réglementaires périodiques (extincteurs, trappe de désenfumage, centrale d'alarme, appareils et accessoires de levage, équipements sous pression...).
- Mise à jour à minima annuelle du Document Unique d'Évaluation des Risques Professionnels, en liaison avec les Médecins de prévention et les Conseillers de Prévention CNRS et UBx.
- Fiches individuelles d'exposition aux produits dangereux mise à jour annuellement.
- Gestion régulière de l'enlèvement des déchets Chimiques et suivi du registre des déchets dangereux.
- Evacuation de déchets amiantés.
- Evacuation de déchets contaminés au mercure.
- Installation d'une nouvelle centrale incendie au bâtiment château + PRISNA. Avec détection automatique, asservissement portes coupe-feu...
- Diverses actions ponctuelles relatives à la maîtrise des risques (produits chimiques, risque incendie, formation des personnels, habilitations électriques, amiante, plans de prévention...).
- Mise à jour des plans d'évacuation.
- Vérification périodique des systèmes de climatisations supérieurs à 12Kw par organisme agréé.
- Recyclage formation chariot élévateur et pont roulant.
- Recyclage certification SF6.



©Ümit YILDIRIM from Unsplash

ASSISTANTS DE PRÉVENTION

Sébastien LEBLANC
Thierry BATAILLE

2

ACTIONS PROGRAMMÉES

- Maintenir les connaissances des personnels via des recyclages en habilitation électrique, premiers secours et manipulation d'extincteurs.
- Mise à jour du protocole incendie avec le PCSI (Poste Central Sécurité Incendie) de Bx.
- Mise en place d'une cellule de crise au niveau du laboratoire.
- Remplacement et évacuations des paratonnerres radioactifs. (Suivi par les PCR)

COMMUNICATION

La communication du laboratoire est avant tout l'affaire de l'ensemble du personnel qui participe aux différentes actions entreprises. Le pôle est géré par une chargée de communication soutenue par la Direction du laboratoire, une cellule communication et différents acteurs participants activement à des projets définis. Le pôle a pris son essor au cours de ces 5 dernières années, tant en terme de communication externe, qu'interne.

Le pôle assurant les actions de communication et médiation scientifique a en charge :

- l'organisation, le suivi logistique de nombreux événements internes à la vie du laboratoire mais assure également l'organisation, la médiatisation et le suivi logistique et budgétaire de conférences scientifiques internationales ;
- la valorisation et la médiatisation des travaux de recherche du laboratoire, la diffusion de la culture scientifique et l'accueil de jeunes publics au sein du laboratoire.

Le service réalise différents supports de communication pour le laboratoire (plaquette, rapport d'activité, poster, affiches, programmes...) et à la responsabilité éditoriale du site internet.

Le CENBG participe activement tout au long de l'année à de nombreux événements afin de diffuser la culture scientifique et technique à destination du grand public.

Afin de structurer les activités d'animation et de communication du laboratoire, une cellule communication regroupant un référent de chacune des grandes thématiques est en place au sein du laboratoire.

Le personnel du CENBG s'implique activement aux diverses actions d'animation scientifique et technique du laboratoire vers des publics variés. De plus en plus d'initiatives sont mises en place en interne comme en externe.

Les membres du CENBG interviennent à destination du grand public sous des formes variées qui viennent ponctuer les activités de communication:

- Conférences de vulgarisation dans les lycées ou à destination du "grand public" ;
- Opérations pédagogiques à destination des jeunes ;
- Interventions à destination des élèves de primaire, collèges, lycées en classe ou lors de manifestations ;
- Participation à différentes opérations "café des sciences", "cinéma sciences", "fêtes de la science"...
- Projets "Arts et Science",
- Conférences internationales, workshops
- ...

Au total, pendant la période 2015-2019, environ 80 conférences ont été données par les membres du laboratoire.

Le laboratoire participe également à l'opération "Les enseignants dans les laboratoires" en accueillant 3 à 5 enseignants par an. A l'initiative du CNRS et du rectorat de Bordeaux cette opération est l'occasion pour ces enseignants de passer plusieurs journées dans le laboratoire et de s'informer dans la discipline qu'ils enseignent au quotidien.

Enfin afin de valoriser la communication entre tous et veiller à un "mieux vivre ensemble" certaines actions sont valorisées comme la création d'un espace commun, un repas de Noël, un barbecue estival, un potager participatif...

CHARGÉE DE COMMUNICATION

Fanny CADOU

CELLULE COMMUNICATION

Christine MARQUET

Stéphane GREVY

Teresa KURTUKIAN-NIETO

Jérôme BAUSSART

Fabrice PIQUEMAL

Isabelle MOREAU

Gregory CANCEL

Claire SERGEANT

Emmanuel CHAUVEAU

Jean-Christophe CAILLON

David SMITH

Philippe MORETTO

Benoît LOTT

Ludovic MATHIEU

Mathias GERBAUX

1

VERS LES COLLÉGIENS, LYCÉENS, ÉTUDIANTS

Parmi les nombreuses actions menées vers les collégiens, lycéens, étudiants, le personnel du laboratoire est régulièrement appelé à participer à des forums métiers ou formations ayant pour objectif de mettre en relation le personnel de la recherche avec les jeunes. Au travers de témoignages et d'une présentation des métiers de la recherche les agents permettent aux jeunes de découvrir une filière et de collecter des informations pour une orientation future.

Le laboratoire accueille en moyenne 500 lycéens et étudiants de la région par an, qui viennent découvrir notre établissement par le biais de visite guidée souvent complétée de présentations et/ou conférences.

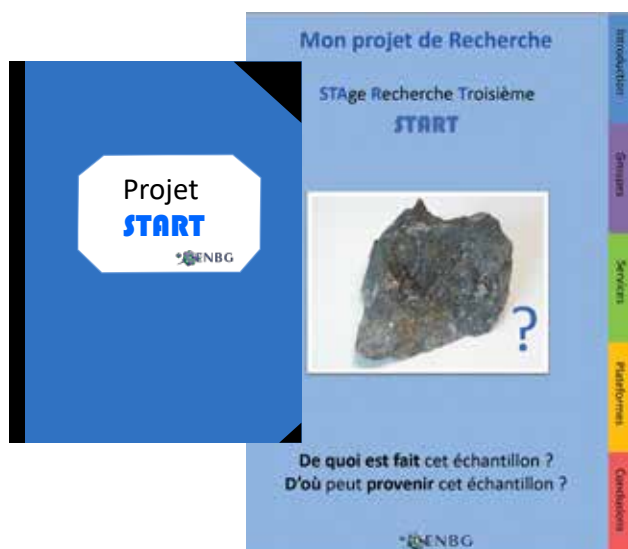


| STAGE DÉCOUVERTE 3ÈME

Le laboratoire accueille chaque année une quarantaine de collégiens dans le cadre d'un stage de découverte d'une semaine. Afin de permettre et d'encourager les collégiens à acquérir des connaissances scientifiques en utilisant une démarche d'investigation un "projet START" à l'initiative d'un groupe de chercheurs a été mis en place.

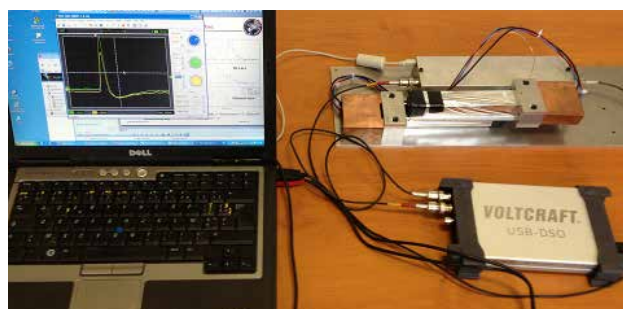
Le projet est abordé au travers d'une énigme que les élèves ont à résoudre en adoptant une démarche de "Recherche" abordant les différentes compétences scientifiques et techniques du Laboratoire.

Par le biais de ce mini projet de recherche et d'un emploi du temps les élèves rencontrent les différents acteurs du laboratoire. Ils passent une partie du temps avec des chercheurs travaillant sur des sujets divers et découvrent également les métiers de "soutien à la recherche" afin d'échanger avec eux et découvrir les différents métiers de la Recherche et leurs complémentarités.



| COSMIX COSMAX MASTERCLASSES

Le projet COSMIX met à disposition des professeurs de lycée des détecteurs de muons atmosphériques très simples d'utilisation. Ces détecteurs proviennent du recyclage des barreaux d'Iodure de Césium du calorimètre et leur électronique utilisés pour les tests du télescope Fermi-LAT précédant le lancement. Les barreaux, lus par deux photodiodes, ont été coupés en deux pour permettre de réaliser des coïncidences. Chaque détecteur est robuste, léger, facilement transportable dans une petite mallette et ne nécessite qu'un câble USB pour son alimentation. Les signaux issus des deux demi-barreaux peuvent être visualisés par un oscilloscope. Un système d'acquisition simple basé sur Arduino permet le comptage des muons et l'enregistrement de leur temps d'arrivée. Une cinquantaine de mallettes ont été réalisées, dont environ 35 circulent dans des lycées français (Aquitaine, Ile-de France, Alsace, Réunion, Corse) ou étrangers (Suisse, Canada, Vietnam, Espagne). Le flux de muons a été mesuré par les lycéens dans les endroits les plus divers (en montagne, en avion, dans des tunnels, sur et sous l'eau, en Antarctique....). Les autres détecteurs ont été acquis par des laboratoires français ou étrangers (dont le CERN) pour leurs opérations de communication.



Le projet COSMAX permet à des non-experts, dont le grand public, d'accéder aux données du LAT pour réaliser des cartes du ciel (statiques ou animées) et de mettre en évidence, potentiellement en temps réel, des événements cosmiques intéressants (sursauts solaires, sursauts gamma, éruptions d'AGNs, novae....). COSMAX est couramment utilisé pour l'accueil de stagiaires dans des groupes appartenant ou non à la collaboration du Fermi-LAT. Les logiciels sont installés sur des machines virtuelles VMware/VirtualBox Linux à télécharger sur son PC. Depuis 2015, des Masterclasses sur "Les trous noirs vus en rayons gamma", basées sur COSMAX, sont organisées deux fois par an sur une journée pour des classes de Première et de Terminale. Ces Masterclasses ont concerné une vingtaine de classes de l'académie de Bordeaux.



Au travers de nombreuses interventions, conférences, visites, conférence-débat, café-science, ciné-débat... le laboratoire diffuse la culture scientifique et technique à destination du grand public.

C'est en moyenne une vingtaine de conférences vulgarisées qui sont données par an à destination du grand public, clubs scientifiques, écoles... ayant pour sujet différents thèmes comme par exemple:

- "De la masse du neutrino à la datation du vin"
- "Les nouvelles astronomies"
- "L'histoire de Neil Amstromg et du premier alunissage"
- "L'observation du ciel d'hiver"
- "Les trous noirs"
- "Les voyages interstellaires"
- "Les déchets nucléaires en France: inventaire et solutions actuelles et futures"
- "Première détection d'ondes gravitationnelles"
- "Dernières nouvelles de Double Chooz"
- "L'astronomie en rayons gamma"
- "Les lumières du Ciel"
- "L'énigmatique neutrino"
- "Jazz pulsars"
- "Prix Noble de physique 2015"
- "Les Pulsars en Rayons Gamma"
- "Le Big-Bang: le début du temps"
- "Les Rayons cosmiques et l'Origine du Monde"
- ...



2017 | NUIT DES ONDES GRAVITATIONNELLES

C'est par le biais d'une conférence "Première détection d'ondes gravitationnelles" que le CENBG a participé à la nuit des ondes gravitationnelles. Cet événement organisé par le CNRS et la Société Française de Physique dans une quinzaine de villes de France et d'Italie, dont Bordeaux, célébrait la découverte des ondes gravitationnelles annoncée en 2016.

2016 | JOURNÉE PORTES-OUVERTES

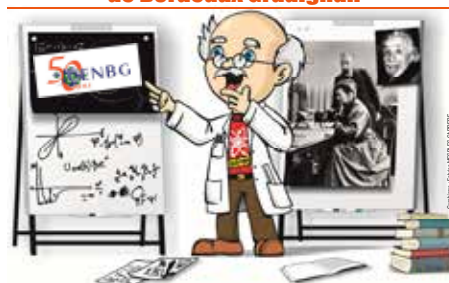
Ateliers de découverte, expériences amusantes pour les jeunes, animations scientifiques pour les plus petits avec tours de magie par la compagnie Nukku Matti, vidéos et posters, ont permis une approche simple des travaux du laboratoire.

Le temps d'une journée, le CENBG a proposé des animations et visites à caractère scientifique autour du thème de l'infiniment petit à l'infiniment grand.

Occasion pour le grand public de découvrir le laboratoire, de rencontrer des chercheurs, enseignants chercheurs, ingénieurs, techniciens et de visiter les plateformes de haute technologie sur lesquelles ils travaillent (accélérateur de particules, mesures de basses radioactivités dans l'environnement, spectromètres de masse...).

Grâce à une mobilisation de tout le personnel, le laboratoire a vu près de 500 visiteurs venir découvrir de nombreux stands, démonstrations, présentations, conférences.

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES de Bordeaux Gradignan



PORTES OUVERTES du laboratoire de recherche

Visites
Expériences amusantes
Ateliers enfants

Physique nucléaire # Neutrinos # Ondes gravitationnelles # Radioactivité # Accélérateur de particules # Rayonnement cosmique # Métiers de la recherche # Météorites # Datation

**2 octobre 2016
de 10h à 18h00**

Informations :
<http://www.cenbg.in2p3.fr>

Contact :
cadou@cenbg.in2p3.fr - 05 57 12 07 76
19 Chemin du solarium GRADIGNAN

Buvette et restauration sur place possible



Tous les deux ans en moyenne le CENBG organise une journée du laboratoire

En plus d'événements spéciaux comme des retransmissions ou célébrations particulières, des séminaires donnent l'opportunité d'échanger entre scientifiques, de partager des connaissances.

Différents séminaires, "cafés labos", "labo parle au labo", séminaires d'intérêts collectifs sont régulièrement organisés au CENBG. Des thèmes très divers y sont présentés de manière informelle, actualités des groupes ou services, sujets d'intérêts généraux, vie du laboratoire, présentations pédagogiques destinées à l'ensemble du personnel. Des personnalités scientifiques sont également invitées. Ces rendez-vous ont lieu régulièrement et tous les membres du laboratoire peuvent y participer.

SÉMINAIRE **Nuclear-structure studies using ion traps and lasers at ISOLDE/CERN**

Vladimir Manea
IKS, KU Leuven, Belgium

salle des séminaires du CENBG

Vendredi 1 Février 2019 à 11h15
café servi à partir de 11h

ISOL TRAP

Since their introduction to nuclear physics more than thirty years ago, ion traps have gradually become key tools for low-energy experiments with radioactive ion beams, either in the preparation or in the final measurement stage. During the last years, the development of new ion-trap devices and measurement methods at ISOLDE has helped measure the masses of very neutron-rich nuclides, coming tantalizingly close to 78Ni, a doubly closed-shell nucleus of crucial importance for understanding the fate of nuclear shell structure towards the drip-line. The alliance of ion traps to other techniques has also allowed performing new types of experiments, a recent example being the trap-assisted laser spectroscopy of mercury isotopes, in a large ISOLDE campaign which has mapped one of the most spectacular regions of nuclear deformation and shape coexistence of the nuclear chart.

In this talk, I will present some of these recent developments involving the ISOLTRAP experiment of ISOLDE/CERN and its ion traps, as well as some of the resulting physics with mass measurements and laser spectroscopy. In the end I will present the S3 low energy branch of SPIRAL2, a new-generation setup taking the combination of laser spectroscopy and ion traps to a new level of resolution and to new regions of the nuclear chart.

2018 | 10 ANS DE FERMI

FERMI 10 ANS

Venez revivre avec nous l'excitation du lancement et mesurer le chemin accompli

1er juin 2018
14h00 à 16h15

PROGRAMME

- # Situation et activités pré-lancement
- # Description du lancement et vidéos
- # L'instrument LAT à bord de Fermi
- # Quelques résultats importants de la mission
- # Résultats marquants de l'équipe du CENBG :
 - Restes de supernovae et nébuleuses à vent de pulsar
 - Pulsars
 - Noyaux Actifs de Galaxies et Catalogues
- # Activités grand public

Suivi d'un échange autour d'un verre

CENBG
19 chemin du solum GRADIGNAN

Contact : B. LOTT lott@cenbg.in2p3.fr

Presse écrite, radios, télévisions, les années 2015-2020 sont riches en parutions et permettent de renforcer la visibilité du CENBG sur ses activités de recherche ou de transfert.

A titre d'exemple:

2015 | RADIO CAMPUS

"Neutrino Quésako ?"
"Wat's the fac"...

2015 | JOURNAL SUD OUEST

"La Nasa vient aux lycées"
Une masterclass à Arcachon"

2015 | SUR TV7 à propos du prix Nobel de physique



2015 | REVUE SCIENCES ET Avenir



2017 | JOURNAL LE PROGRÈS

"Comment le Neutrino a servi à l'authentification de grands vins millésimés"

2019 | REVUE CHERCHEURS D'AQUITAINE



Le laboratoire organise et assure le suivi logistique de nombreux événements, conférences, workshop, réunions de collaborateurs...

Plus particulièrement, l'année 2017 a été marquée par la célébration des 50 ans du laboratoire avec une série d'événements.

L'année 2019 célébrait elle les 80 ans du CNRS avec une participation active de notre laboratoire.

Quelques exemples:

2015 | 32ÈMES JOURNÉES DES LABORATOIRES ASSOCIÉS DE RADIOPHYSIQUE ET DE DOSIMÉTRIE - L.A.R.D

Ces journées, réservées aux membres des L.A.R.D., étaient l'occasion de faire le point sur les recherches les plus récentes menées en radiophysique et en dosimétrie, permettant en particulier aux jeunes chercheurs (doctorants, post-doctorants) d'exposer oralement leurs travaux et de partager leurs connaissances dans un environnement convivial.



2015 | 19ÈME COLLOQUE GANIL

Le colloque ayant pour but d'examiner et de discuter les recherches menées au GANIL et les activités connexes menées dans des installations similaires à travers le monde a été co-organisé par le GANIL et le CENBG.



2017 | 50 ANS DU CENBG

L'année 2017 constitue un jalon important dans la vie du CENBG et plus largement dans l'histoire de la Physique Nucléaire et Corpusculaire à Bordeaux. Cette année a marqué le cinquantenaire de l'installation des équipes de recherche sur le site de Gradignan début 1967, préfiguration du CENBG tel qu'il est aujourd'hui.

Formellement, ce n'est qu'en 1968 que les statuts du Laboratoire ont été adoptés dans la foulée des événements de Mai 1968 après la disparition du système des chaires universitaires et dans un contexte en pleine ébullition politique. Le site, ou plus exactement le campus de Gradignan a accueilli au fil du temps différentes composantes, nucléaire expérimentale, nucléaire théorique, radiochimique, chimie nucléaire analytique et bio environnementale, plus ou moins séparées administrativement mais avec néanmoins des histoires étroitement liées. Ce n'est finalement qu'en 2011 que le Laboratoire a entamé, complètement unifié, un nouveau contrat quinquennal comme UMR.

C'est cette histoire riche que nous avons commémoré au cours de l'année 2017 par différents événements :

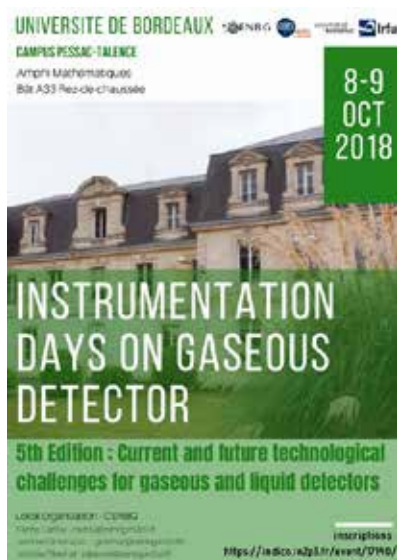
- Une série de cinq conférences à destination du grand public ; Quatre conférences ont été préparées et présentées conjointement par les groupes du laboratoire. Pour l'une des conférences, Sylvie VAUCLAIR, Astrophysicienne était notre invitée.
- Une journée festive rassemblant le personnel actuel et anciens ainsi que les anciens directeurs du laboratoire.

Enfin, cet anniversaire a été clôturé par une journée de célébration le vendredi 15 septembre 2017 avec collègues, anciens, tutelles et collectivités locales et quelques anciens directeur du CENBG et collègues issus de la communauté scientifique.



Un bloc-notes s'insérant également dans cette démarche, retrace quelques éléments de mémoire sur les thématiques scientifiques telles qu'elles se sont développées au Laboratoire en les replaçant dans un contexte d'évolution internationale. L'ensemble des 9 équipes de recherche, des 5 services techniques et administratifs du CENBG ont contribué à ce recueil qui, au-delà de l'aspect commémoratif, donne une image des activités actuelles.





2018 | WORKSHOP GET



2018 | INAUGURATION DU LABCOM P2R

Le 18 juillet 2018 le Labcom P2R (Physique des Particules pour la Radioprotection) P2R a été inauguré en présence de ses collaborateurs, la société CARMELEC.

P2R, met au point des détecteurs de nouvelle génération pour la radioprotection.



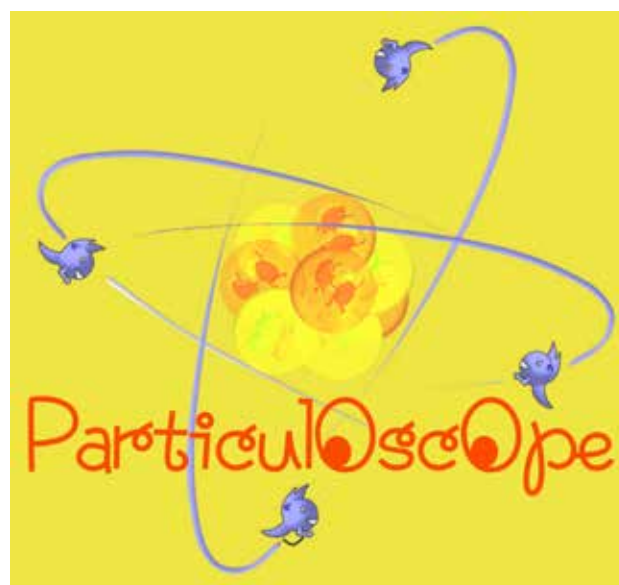
Depuis 80 ans, nos connaissances
bâtissent de nouveaux mondes

L'aventure ParticulOscOpe - Animation Art et Science sur le monde de l'infiniment petit pour le jeune public

Le projet proposé par un groupe de chercheurs du CENBG, à l'occasion de cette célébration, a été retenue et a permis à 8 classes de primaire de découvrir la science de manière ludique.

Le projet, à visée pédagogique pour le jeune public, a pour objectif de présenter le monde de l'infiniment petit en s'appuyant sur des vecteurs de communication variés mêlant Art et Sciences.

Deux temps forts viennent rythmer ce projet, avec la représentation tout d'abord d'une pièce de théâtre dans une salle de spectacles puis l'organisation d'ateliers en milieu scolaire (CE-CM). La pièce de théâtre permet au public une première immersion dans le monde de l'infini petit et de la recherche scientifique au travers d'une approche poétique et artistique développant l'imagination et le questionnement. Dans un second temps, les chercheurs rencontrent les enfants dans leur classe pour apporter un regard scientifique sur le message porté par la pièce. Ce temps d'échange est organisé autour d'ateliers pédagogiques qui permettent aux enfants de s'approprier la notion de particules élémentaires et de structure de la matière.



6

DES PRIX

2016 | PRIX Jeune chercheur

Emmanuel CHAUVEAU du Groupe Neutrino a reçu en 2016 le "Prix TYL du jeune chercheur" à Séoul pour sa contribution aux activités collaboratives franco-japonaises dans le domaine des neutrinos.



2018 | PRIX JOLIOT CURIE

Stéphane GREVY du Groupe Noyaux Exotiques a reçu en 2018 le "Prix Joliot Curie" pour l'originalité de sa démarche scientifique, pour son profil complet et diversifié, et pour sa force de propositions ainsi que pour la portée scientifique de ses résultats.



2019 | BOURSE MARIE S. CURIE ET BOURSE DE THÈSE INTERNATIONALE

Ce projet mené par une équipe de chercheurs et ingénieurs du CENBG a été lauréat d'une prestigieuse bourse européenne de post-doctorat Marie S. Curie et d'une bourse de thèse internationale du CNRS.



**Bourse Marie S. Curie
et bourse de thèse
internationale du CNRS**

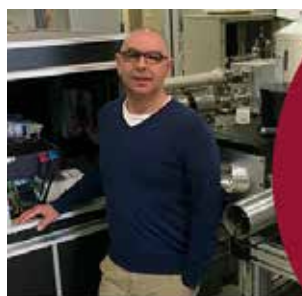
SUNRISE
Set-Up for Nuclear
Reaction studies
at Ion Storage rings

Une partie des membres de l'équipe



80 Prime - Traquer les effets des faibles doses de rayonnements au cœur des cellules

Dans le cadre des 80 ans du CNRS, la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires a mis en place l'appel à projet "80 Prime" dans le but de soutenir et renforcer l'interdisciplinarité entre les instituts du CNRS. Le projet RADIANCE "Etude des conséquences biologiques radio-induites sur le métabolisme ARN chez *Caenorhabditis elegans*" a été retenu.



Projet porté par Hervé Seznec
Chercheur du groupe IRI-BIO

**Projets CNRS
"80 Prime" :
un lauréat au
sein du CENBG**

FORMATION PERMANENTE

Le plan de formation de l'unité est un des leviers du laboratoire pour structurer et consolider le collectif de travail. Il résulte d'une démarche d'analyse des compétences mises à profit par le projet scientifique. La conception du plan de formation concerne et implique donc tous les acteurs du laboratoire.

Le correspondant de formation est le relais :

- entre les conseillers formation de la délégation du CNRS, de l'institut et les personnels CNRS de l'unité ;
- entre le responsable formation de l'Université et les personnels universitaires de l'unité.

CORRESPONDANT FORMATION

Fanny CADOU

Le CENBG élabore et met en œuvre un Plan de Formation d'Unité.

Ce plan de formation poursuit plusieurs objectifs :

- Adapter les personnels à leur poste de travail
- Contribuer aux évolutions des métiers,
- Acquérir de nouvelles compétences
- Soutenir le projet professionnel des agents



1

BILAN

Le personnel du CENBG continue d'actualiser ses connaissances scientifiques et techniques, grâce à des formations proposées en interne comme en externe.

Une moyenne de 35% de l'effectif total du laboratoire a suivi au moins une formation sur les années 2015-2019 avec un volume d'heures de formation annuel moyen de 1 500h/an.

80% des ITA du laboratoire participent à des formations.

Les types de formations suivies concernent principalement l'hygiène et la sécurité, les langues et les connaissances scientifiques.

2

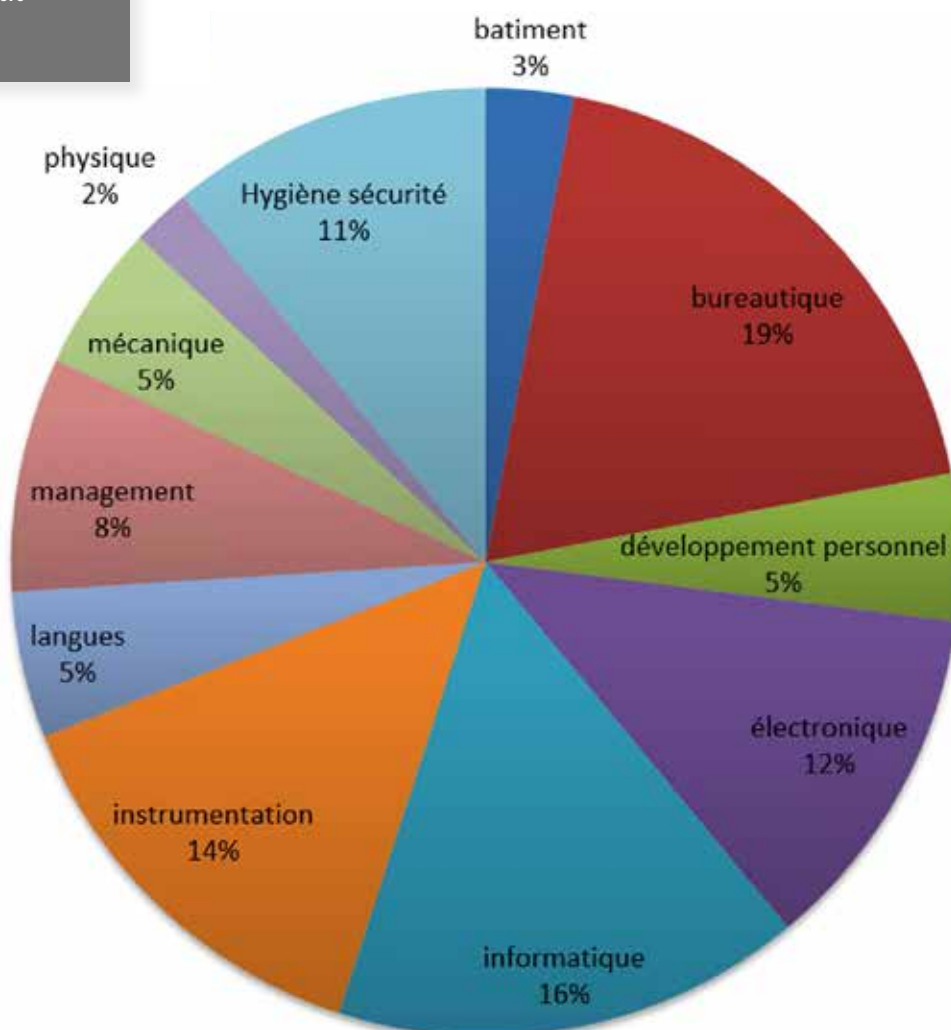
TRANSFERT DE CONNAISSANCES

Le laboratoire transfère sous différentes formes ses connaissances. La première forme de transfert concerne naturellement les enseignements universitaires assurés par nos enseignants-chercheurs et les formations doctorales auxquelles participe le laboratoire. Mais au-delà de cette forme de transfert institutionnelle, les chercheurs et ingénieurs du CENBG proposent régulièrement des stages et tutorats au sein du laboratoire sur un large panel de techniques. Ces stages concernent des étudiants de tous les niveaux, que ce soit en formation généraliste (licence et Master) ou en formation technique. Notamment, le laboratoire a établi une forte collaboration avec l'IUT de Bordeaux qui bénéficie de nos propositions de stages et tutorats. Mais l'IUT fait aussi régulièrement appel à nos ingénieurs, pour dispenser des enseignements techniques relevant de nos compétences.

Le laboratoire est parfois sollicité par le service formation de la délégation régionale Aquitaine pour assurer des enseignements et des formations.

Enfin, le CENBG qui localement apparaît comme un pôle de compétences techniques, s'implique fortement dans l'animation des réseaux locaux de mécaniciens, d'électroniciens et instrumentalistes.

Répartition
des formations
effectuées
par matière



TRANSFERT TECHNOLOGIE VALORISATION

@cenbg

Expertises scientifiques

Prestations Analytiques

Développements
Instrumentaux

CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES
DE BORDEAUX GRADIGNAN
19 chemin du solarium - CS10120 | 33175 GRADIGNAN Cedex | 05 57 12 08 00
<http://www.cenbg.in2p3.fr/>

service-valorisation@cenbg.in2p3.fr

TRANSFERT TECHNOLOGIE VALORISATION

@cenbg



université
de BORDEAUX

certifications



pôles de compétitivités



partenaires



CELLULE DE VALORISATION & TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

Depuis de nombreuses années, le CENBG valorise ses recherches au profit de la sphère économique et sociale par des activités de transferts de technologies, de savoir-faire et de compétences scientifiques et techniques.

En 2019, le CENBG s'est doté d'un groupe de travail ouvert, dans le but de mettre en synergie les différents vecteurs de valorisation existants au laboratoire et tenter d'accroître les impacts sociaux économiques de nos recherches par la mise en place d'actions novatrices.

Ce groupe de travail réunit, autour du directeur, du correspondant valorisation du laboratoire désigné, du chargé de mission aux relations industrielles, des responsables des vecteurs de valorisation existants que sont les cellules de transfert ARCANE et PRISNA-PRESTATIONS ainsi que le laboratoire commun P2R. Ce groupe de travail a vocation à accueillir toute personne voulant s'impliquer concrètement dans une action de valorisation.

Un plan d'action a été établi. Il s'agit d'assurer à la fois une animation interne pour susciter l'intérêt des personnels à valoriser leurs compétences en leur apportant un support dans la mise en œuvre. Mais les mesures les plus novatrices résident dans la mise en œuvre d'actions vers le tissu industriel régional. Pour cela, le CENBG s'investit dans les réseaux industriels tels que le réseau CREATI, le pôle de compétitivité ALPHA-RLH en affichant une offre d'expertises scientifiques, de prestations analytiques et de développement expérimentaux. Le secteur du démantèlement des centrales nucléaires est une cible que nous privilégions dans le court et moyen termes. Enfin nous envisageons d'accroître les rencontres régulières avec les PME régionales pour mieux faire connaître notre expertise.

RESPONSABLE

Gérard CLAVERIE

GROUPE DE TRAVAIL

Cédric CERNA
Frédéric DRUILLOLE
Hervé GUÉGAN
Fabrice PIQUEMAL



SÉMINAIRES

2015

JANVIER

Irradiation ciblée du cerveau du rat par Gamma Knife et imagerie des changements vasculaires et neuronaux

Julie CONSTANZO
Département de Médecine Nucléaire et Radiobiologie Faculté de Médecine, Université de Sherbrooke, Québec, Canada

Association du Département de Physique – DEPhy

Julien LAFFILAY

Microscopic and algebraic theory for nuclear collective structure

Kosuke NOMURA
GANIL Caen

FÉVRIER

Recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos par l'expérience GERDA: résultats et perspectives futures

Carla MACOLINO
Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), INFN, Italie

Mesure de section efficaces de réactions (n , xn γ): Contexte et exemple des isotopes de tungstène

Greg HENNING
Institut Pluridisciplinaire Hubert CURIEN (IPHC), Strasbourg

Scintillating bolometers as promising detectors to search for neutrinoless double-beta decay

Denys PODA
Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM), Orsay

MARS

Politique Management de Projet et Management de la Qualité au sein de l'IN2P3 pour et par les acteurs de la recherche

Philippe LABORIE
Laboratoire de Physique Corpusculaire, Caen
Christian OLIVETTO
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie, Paris ; Direction Technique de l'IN2P3

Radiosensibilité des sarcomes

Giovanna MUGGIOLI
Groupe IriBio | CENBG

De la phénoménologie à la microscopie: une nouvelle approche pour l'évaluation des sections efficaces de fission

Pierre TAMAGNO
CEA Cadarache - REPORTE

Simulation Monte Carlo des réactions de transfert par matrice R généralisée : application au système U-237

Olivier BOULAND
CEA Cadarache - REPORTE

Microscopic description of fission using dynamical theories

Guillaume SCAMPS
Université du Tohoku, Sendai (Japon)

AVRIL

Pièges en terre exotique

Pauline ASCHER
Groupe NEX | CENBG

The Planck 2015 release: general overview of the Planck results and news from neutrino sector

Maria SPINELLI
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL), Orsay

Présentation du contrat CIFRE et du projet BADGE

Maxime KARST
Groupe Neutrino | CENBG
Café labo

La maison pour la science en Aquitaine au service des professeurs

Mauricette MESGUICH
Maison de la Science en Aquitaine

MAI

PRISNA-prestations

Hervé GUEGAN
Cellule ARCANÉ | CENBG

Toxicologie nucléaire du cobalt: apport de l'imagerie par faisceau d'ions

Richard ORTEGA
Groupe ICS | CENBG

La recherche d'onde gravitationnelle: place à la nouvelle génération d'instruments

Nicolas LEROY
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL), Orsay

JUIN

Modélisation multi physiques des Single Event Effect - Caractérisation de l'environnement radiatif atmosphérique

Guillaume HUBERT
ONERA, Département Environnement Spatial (DESP), Toulouse

Cyberwar: et nous là-dedans ?

Serge BORDERES
Service Informatique | CENBG

Excursion astrophysique au GANIL

François DE OLIVEIRA SANTOS
GANIL

Some statistics of Galactic supernova remnants

Dave GREEN
Cavendish Laboratory, Université de Cambridge, Royaume Uni

JUILLET

Beta decay studies around ^{78}Ni : Investigation of neutron rich Ni isotopes

Anabel MORALES
Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano, Italie

AOUT

Searching for physics beyond the Standard Model via nuclear beta decay

Paul FINLAY
Institut de Physique Nucléaire, Université de Louvain (Belgique)

SEPTEMBRE

Quelques applications au laboratoire d'analyse par faisceaux d'ions à Beyrouth (Liban)

Mouhamad ELBAST
Faculté des Sciences de l'Université Libanaise, Commission Libanaise de l'Energie Atomique (CNRS-Libanaise)

The impact of new thermonuclear reaction rates of $^{64}\text{Ge}(p,\gamma)^{65}\text{As}$ and $^{65}\text{As}(p,\gamma)^{66}\text{Se}$ for type-I X-ray bursts

Yi Hua LAM
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Chine

Quelles bactéries dans l'environnement d'anciens sites miniers d'uranium français ?

Claire SERGEANT
Groupe RADEN | CENBG

OCTOBRE

Super-thin scCVD diamond membranes for radiation detection applications

Michal POMORSKI
CEA-LIST

Open science: sur la diffusion des logiciels et autres productions d'un laboratoire - (Slides)

Teresa GOMEZ-DIAZ
Laboratoire d'Informatique Gaspard-Monge (LIGM, Université Paris-Est Marne-la-Vallée)

Solar neutrino and latest geo-neutrino results with Borexino

Romain RONCIN
Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Italie)

Les vestiges de supernova à haute énergie

Benjamin CONDON
Groupe Astroparticules | CENBG

NOVEMBRE

Mallettes pédagogiques et masterclasse sur les trous noirs, deux initiatives envers les lycées

Benoit LOTT
Groupe Astroparticules | CENBG

Mais que fait ENL derrière les murs du SAMES ?

Maud VERSTEEGEN
Groupe ENL | CENBG

Hadronthérapie: de l'optimisation physique à l'adaptation biologique du plan de traitement
Cécile BOPP
National Institute of Radiological Science, Chiba (Japon)

Trends in the detection of Rare Interactions with gaseous Time Projection Chambers
Diego GONZALEZ-DIAZ
CERN - REPORTE

DÉCEMBRE

Dosimétrie multi-résolution pour l'optimisation de la Radiothérapie Interne Vectorisée
Sara MARCATILI
Centre de Recherche en Cancérologie, Toulouse

Vers quel modèle pour l'enseignement supérieur et la recherche ? Un essai de synthèse
Mourad AÏCHE
Groupe ACEN | CENBG



JANVIER

Ab initio studies of light nuclei
Andrey M. SHIROKOV
Institute for Nuclear Physics, Université de Moscou, Russie

Trends in the detection of Rare Interactions with gaseous Time Projection Chambers
Diego GONZALEZ DIAZ
CERN

Présentation du projet START (stages de collège)
Fazio HANNACHI
Groupe ENL | CENBG

FÉVRIER

Sterile neutrino search: the STEREO experiment
Victor HELAINE
IPSC Grenoble

Les déchets nucléaires en France: inventaire et solutions actuelles et futures
Denis HORLAIT
Groupe RADEN | CENBG

Nuclear structure around N=50: Shape coexistence and neutron monopole drift
Andrea GOTTARDO
Institut de Physique Nucléaire (IPN) d'Orsay

The Galactic Centre as a powerful cosmic PeVatron
Aion VIANA
MPIK Heidelberg, Allemagne

Première détection d'ondes gravitationnelles
David SMITH
Groupe Astroparticules, | CENBG

MARS

High precision ray tracing simulation for Mediterranean neutrino telescopes
Christophe HUGON
Institut de Physique Nucléaire de Gênes (Italie)

Pulse shape studies and latest results of the Double Chooz experiment, and status of the STEREO experiment
Alessandro MINOTTI
CEA Saclay

Dernières Nouvelles de Double Chooz
Emmanuel CHAUVEAU
Groupe Neutrino | CENBG

Thomas GOIGOUX
Groupe NEX | CENBG

AVRIL

Installation du calorimètre & développement d'une simulation optique pour SuperNEMO
Arnaud HUBER
Groupe Neutrino | CENBG

Mesures précises des demi-vies et rapports d'embranchement pour la décroissance β des noyaux miroir ^{23}Mg et ^{27}Si
Cécile MAGRON
Groupe NEX | CENBG
Séminaire doctorant

GET STORY
Jean-Louis PEDROZA
Service Electronique | CENBG

Accélération d'électrons par ondes plasma et lasers
Arnd SPECKA
LLR, Ecole Polytechnique

Portes ouvertes du labo
Fanny CADOU
Service Communication | CENBG

Les trous noirs
Benoît LOTT
Groupe Astroparticules | CENBG

MAI

L'interaction nucléaire illustrée
Ludovic BONNEAU
Groupe Physique Théorique | CENBG

The DarkSide Program for Direct Dark Matter Searches and Its Technologies for Liquid Argon Experiments
Cristiano GALBIATI
Université de Princeton (Etats-Unis)

A la recherche des Fragments de Fission perdus
Ludovic MATHIEU
Groupe ACEN | CENBG

A bet for ontological pluralism: arguments from Physics
Javier SANCHEZ CANIZARES
Institut de la Culture et Société (ICS) de l'Université de Navarre (Espagne)

New approach to experimental observation of the Breit-Wheeler pair generation process
Xavier RIBEYRE
CELIA

PIPERADE: it's a trap
Mehdi AOUADI
Groupe NEX | CENBG
Café labo doctorant

JUIN

The neutron electric dipole moment search at the Paul Scherrer Institute
Yoann KERMAÏDIC
LPSC Grenoble

Les voyages interstellaires
Jean-Christophe CAILLON
Groupe Physique Théorique | CENBG

Label Fiabilité mesures: une alternative pour mettre en valeur les compétences des laboratoires de recherche
Lise HEGRON
Centre Technologique Méditerranéen de Métrologie (CT2M)

Laser Plasmas for Accelerator and Nuclear Physics
Christopher MURPHY
Université de York, Royaume Uni

Développement de la mesure par spectrométrie gamma en coïncidence
Hugues PARADIS
IRS[N] - Laboratoire de Mesure de la Radioactivité dans l'Environnement (LMRE)

Copper loss in the Parkinson's disease brain
Benjamin TRIST
Brain and Mind Centre, Sydney Medical School, The University of Sydney, Australie

JUILLET

Observer le ciel d'été
Benoît LOTT
Groupe Astroparticules | CENBG

Formation and Dynamics of fission fragments
Cédric SIMENEL
Département de Physique Nucléaire, Australian National University, Canberra (Australie)

Rôle de la structure nucléaire pour les tests du Modèle Standard à basse énergie
Latsamy XAYAVONG
Groupe Physique Théorique | CENBG

AOÛT

Measurements of neutron-induced reactions in inverse kinematics
René REIFARTH
Université de Francfort / GSI, Allemagne

SEPTEMBRE

Plateformes d'irradiation neutrons au LPSC: machines GENEPI et GUINEVERE

Jean-Marie de CONTO
LPSC Grenoble

Le réseau de télescopes HESS: Exploration de l'Univers non thermique à Très Haute Energie

Mathieu DE NAUROIS
Laboratoire Leprince-Ringuet, Ecole Polytechnique (Palaiseau)

e-ASTROGAM: vers une nouvelle mission spatiale d'astronomie gamma

Vincent TATISCHOFF
Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM - Orsay)

Les voyages vers le passé

Jean-Christophe CAILLON
Groupe Physique Théorique | CENBG

L'histoire de Neil Armstrong et du premier alunissage

Serge BORDERES
Service Informatique | CENBG

Un moteur électrique ultra-simple

Benoit LOTT
Groupe Astroparticules | CENBG

Le service mécanique et ses outils

Mathieu ROCHE
Service Mécanique | CENBG

OCTOBRE

Groupe IriBio | CENBG

Les avantages et inconvénients des différents moyens de production d'électricité

Denis HORLAIT
Groupe RADEN, | CENBG

Unified Ab Initio Approaches to Nuclear Structure and Reactions of Light Nuclei

Guillaume HUPIN
CEA-DAM Arpaion

Thomas BONNET
Groupe ENL | CENBG

NOVEMBRE

Impact des radiations sur la santé des poissons de Tchernobyl

Adélaïde LEREBOURS
Institute of Marine Sciences, University of Portsmouth

Datation du vin par des mesures de très faible radioactivité

Philippe HUBERT
Groupe Neutrino | CENBG

Intégration du calorimètre de SuperNEMO en direct du LSM

Groupe Neutrino | CENBG

DÉCEMBRE

Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire)

Serge CZAJKOWSKI
Groupe ACEN | CENBG

Testing the Standard Model in beta-decay: status and prospects

Nathal SEVERINIS
Institute for Nuclear and Radiation Physics, KU Leuven University

2017

JANVIER

L'observation du ciel d'hiver

Benoit LOTT
Groupe Astroparticules | CENBG

FÉVRIER

Composition des éléments volatils émis par la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko analysés par la sonde Rosetta: Quelques implications astrophysiques et planétologiques

Bernard MARTY
CRPG Nancy

GEANT 4

Sébastien INCERTI
Groupe IriBio | CENBG

MARS

Entering the era of precision neutrino physics: the role of short- and medium-baseline reactor experiments

Marco GRASSI
Laboratoire d'Astroparticules et Cosmologie de Paris

Les correspondants Information Scientifique et Technique (CORIST) dans les labos IN2P3

Ludovic BONNEAU
Groupe Théorie | CENBG

AVRIL

Chasing the light sterile neutrino: status of the STEREO experiment

Alessandro MINOTTI
Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers, CEA Saclay

Isabelle MOREAU
Service Informatique | CENBG

Développement de Briques de base électronique pour des expériences de Physique: La R&D GES

Frédéric DRUILLLOLE
Service Electronique | CENBG

La Chimie de la Mémoire

Richard ORTEGA
Groupe ICS | CENBG

MAI

Les critères pour réussir la transition énergétique

Bernard TAMAIN
Professeur Emérite, ENSI Caen

JUIN

Shell model states in the continuum: tetraneutron resonance

Andrey M. SHIROKOV
Institute for Nuclear Physics, Moscow State University

Studying (α, γ) reactions at Notre Dame

Gwénaëlle GILARDY
University of Bordeaux + ISNAP & JINA, University of Notre Dame

The Quest for the Infinite Small: Particle Physics in China

Yifang WANG
Institute of High Energy Physics, Beijing

La dernière expérience du groupe ACEN

Ricardo PEREZ SANCHEZ
Groupe ACEN | CENBG

JUILLET

Développement de l'imagerie chimique nanoscopique corrélative (rayonnement X/ photonique) pour l'étude du rôle des métaux dans la plasticité et la toxicité synaptique

Florelle DOMART
Groupe ICS | CENBG
Café labo

AOÛT

Le projet DIRAC: Détecteurs Diamant pour la Radiobiologie à l'échelle Cellulaire

Philippe BARBERET
Groupe IriBio, | CENBG

Réexamen du rôle du processus $(n, \gamma f)$ dans la fission de basse énergie et illustration avec le noyau lourd $^{240}\text{Pu}^*$

Olivier BOULAND
Physics Studies Laboratory, CEA Cadarache

Observation de la fusion de deux étoiles à neutrons + processus-r / séminaire chercheurs

Teresa KURTUKIAN NIETO et Benoit LOTT
Groupes NEX et Astroparticules | CENBG
Le labo parle au lab

NOVEMBRE

Observation de la fusion de deux étoiles à neutrons + processus-r

Benoit LOTT
Groupe Astroparticules | CENBG
Le labo parle au labo



How CENGB Helped Discover the Largest Mass Poisoning in History: Metal-affected Drinking Water in Bangladesh, India, and Myanmar

Seth H. FRISBIE

Department of Chemistry and Biochemistry
Norwich University, USA

DÉCEMBRE

CHIPS: a possible path to faster measurements of neutrino oscillation physics

Jenny THOMAS

University College London

GENIE: neutrino Monte Carlo generator

Anselmo MEREGAGLIA

Groupe Neutrino | CENBG

Café labo

Demi-journée mémoire Jack DONOHUE, CENBG

La mission Cassini-Huygens d'exploration du Système de Saturne

Françoise BILLEBAUD

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux

FÉVRIER

Investigating the nature of the neutrino: from SNO to SNO+

Nuno BARROS

University of Pennsylvania

Transfer and fusion-induced fission in inverse kinematics. The access to new observables

Diego RAMOS

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Neutrino Oscillation and other Quantum Oscillations

Fumihiko SUEKANE

Research Centre for Neutrino Science, Tohoku

Présentation du LCAE et de ses projets de spectrométrie gamma à bas taux de comptages

Adrien SARI et Jonathan DUMAZERT

Laboratoire Capteurs et Architectures
Electroniques, CEA-LIST

Pathway to the next generation of LBN experiments with the CERN Neutrino Platform

Stefania BORDONI

CERN

La Voie Lactée dévoilée par H.E.S.S.

François BRUN

Groupe Astroparticules | CENBG

Le service de mels au CENBG: migration de ce service au Centre de calcul de l'IN2P3.

Isabelle MOREAU

Service Informatique | CENBG

On the saw-tooth structure of neutron multiplicity

Fedir IVANIUK

Institute for Nuclear Research, Kiev

Nuclear structure and dynamics beyond the mean-field

Matthew BARTON

University of Surrey

The two-nucleon system within Chiral Effective Field Theory

Mario SANCHEZ

IPNO

Latest results from Daya Bay

Bei-Zhen HU

National Taiwan University

Energie nucléaire: quels avènements pour les déchets ?

Denis HORLAIT, Ludovic MATHIEU,

Claire SERGEANT

Groupe RADEN | CENBG

Moving towards SUNRISE: Solar Cells, a highly interesting option for the detection of heavy ions

Ana HENRIQUES

Groupe ACEN | CENBG

Unveiling Galactic cosmic-ray accelerators with gamma-ray observations: their relation to supernova remnants - Soutenance d'HDR

Marianne LEMOINE-GOUMARD

Groupe Astroparticules | CENBG

2018

JANVIER

L'ouverture des données de la recherche: quelles conséquences juridiques pour le chercheur ?

Hélène SKRZYPNIAK

Université de Bordeaux - URFIST

Une possible unification des forces de Newton et de Coulomb

Jean-Christophe CAILLON
Groupe Physique Théorique | CENBG

Unravelling uranium neurotoxicity throughout biochemical and imaging approach

Francesco PORCARO
Groupe ACEN | CENBG

PRISNA pète les plombs !

Hubert CHIRON
Service Instrumentation, PRISNA | CENBG

LISA: Observing gravitational waves from space

Antoine PETITEAU
LAL

Physique des ions lourds à LHCb: du mode collisionneur à la cible fixe

Emilie MAURICE
LLR

Du FRS au Super-FRS: opportunités dans l'exploration de nouveaux isotopes

Stéphane PIETRI
GSI

Bienvenue sur la plateforme technologique SIAM

Julien COLAUX
Université de Namur

Développement d'un formulaire de calcul pour l'évaluation du terme source dans les opérations d'assainissement-démantèlement des installations nucléaires

Maxime SOULARD
CEA Cadarache

Informations RH sur Ariane et missions assistance sociale

Cecile FAVERAU, Stéphanie ROUGIER,
Virginie Boignard
Subatech

013: From the 'discovery' to the sub-percent precision era (2000 - 2030)

Thiago SOGO BEZERRA
Subatech

AVRIL**On the origin of mass asymmetric fission**

Cedric SIMENEL
Australian National University

RAAD: a cubesat based soft γ -ray detector for the study of terrestrial γ -ray flashes and other short timescale phenomena

Mallory STRIDERS ROBERTS
New York University Abu Dhabi

MAI**Proton-neutron force and proton single particle strength**

Pawan KUMAR
Indian Institute of Technology Ropar

Sun Yat-sen University and Our Efforts in Big Science

Dongbai SUN, Wei WANG
Sun Yat-sen University

JUIN**Observer le ciel d'été**

Benoit LOTT
Groupe Astroparticules | CENBG

Analyses isotopiques dans les poussières cométaires

Jean DUPRAT
CSNSM

A new approach to nuclear evaluation using a self-consistent multichannel modelling methodology

Aloys NIZIGAMA
CEA Cadarache

Mean-field studies of rare earth nuclei within Skyrme energy-density functional

Meng HOCK KOH
Universiti Teknologi Malaysia

JUILLET**Probing the Higgs Yukawa couplings at the LHC**

Konstantinos NIKOLOPOULOS
University of Birmingham

Status of the KM3NET deep sea neutrino telescope

Paschal COYLE
CPPM

Les projets en laboratoire dans les cursus de l'Université de Bordeaux

Philippe Barberet
Groupe IRIBIO | CENBG

1969-2019: Il y a 50 ans le premier ordinateur sur la Lune

Serge BORDERES
Service Informatique | CENBG

SEPTEMBRE**Utilisation de laser focalisé pour la caractérisation d'échantillons**

Pilar PUYUELO VALDES,
Groupe ENL | CENBG
Stephanie SORIEUL
Service Instrumentation | CENBG

LiquidO - Seeing through darkness to find new physics

Mark CHEN
Queen's University, Canada

Detection of primordial heavy noble gases in Yellowstone National Park

Michael BROADLEY
CRPG, Nancy

Evaluation of the theoretical nuclear matrix element for $\beta\beta$ decay of ^{76}Ge

Alex BROWN
NCSL, Michigan State University

Cibles gazeuses supersoniques de haute densité pour l'accélération d'ions par laser

José Luis HÉNARÈS
Groupe ENL | CENBG

Mesure de moment électrique dipolaire sur anneau de stockage: effet des déflecteurs électrostatiques sur la dynamique de spin

Julien MICHAUD
Groupe NEX | CENBG

Bernard LAVIELLE
Groupe RADEN | CENBG

2019

JANVIER**Les composants DAQ du futur**

Frederic DRUILLLOLE
Service électronique | CENBG

FÉVRIER**Nuclear-structure studies using ion traps and lasers at ISOLDE/CERN**

Vladimir MANEA
IKS, KU Leuven, Belgium

Valorisation de la recherche au CENBG

Gerard CLAVERIE
Hervé GUÉGAN
Service Valorisation | CENBG

MARS**A new leading contribution to neutrinoless double beta decay**

Ubirajara VAN KOLCK
IPN Orsay

ASCHER Pauline
 BLANK Bertram
 CANCEL Gregory
 CARMONA Asuncion
 CHAUVEAU Emmanuel
 GILBERT Eric
 GIOVINAZZO Jerome
 GREVY Stéphane
 HANNACHI Fazia
 HORLAIT Denis
 INCERTI Sebastien
 JURADO APRUZZESE Beatriz
 KURTUKIAN NIETO Teresa
 LAVIELLE Bernard
 LEMOINE-GOUMARD Marianne
 LOTT Benoit
 MARQUET Christine
 MATHIEU Ludovic
 MEREGAGLIA Anselmo
 ORTEGA Richard
 PIQUEMAL Fabrice
 REPOSEUR Thierry
 SERGEANT Claire
 SEZNEC Herve
 SMITH David

AICHE Mourad
BARBERET Philippe
BONNEAU Ludovic
CAILLON Jean-Christophe
CZAJKOWSKI Serge
DUMORA Denis
GERBAUX Mathias
GOBET Franck
GRONDIN Marie Hélène
JOLLET-MEREGAGLIA Cécile UStrasbourg
MICHELET Claire
MORETTO Philippe
PERROT Frédéric
SMIRNOVA Nadezda
TARISIEN Medhi
TSEKHANOVICH Ihar
VERSTEEGEN Maud

CDD CHERCHEURS
DE ROUBIN Antoine
DEVIN Justine
HÉNARÈS Jose Luis
HENRIQUES Ana Isabel
HUSSON Audric
MARINI Paola
POMORSKI Marcin
MICHAUD Julien
SANCHEZ Mario
WILLIAMSON Adam
ZEIN Sara

DE ROUBIN Antoine
DEVIN Justine
HÉNARÈS Jose Luis
HENRIQUES Ana Isabel
HUSSON Audric
MARINI Paola
POMORSKI Marcin
MICHAUD Julien
SANCHEZ Mario
WILLIAMSON Adam
ZEIN Sara

CR
CR
CR
DR
DR
CR
CR
CR
DR

ATUKPOR Emmanuel Friday
BEAUDIER Pierre
BORDEREAU Clement
CECCHINI Vincent
CHATEL Carole
HOLUB Guillaume
LI Zhuxin
MARES Arnaud-Rémi
ORTEGA MORAL Aurora
PALUSOVA Veronika
PIN Axel
PUYUELO VALDES Pilar
SGUAZZIN Michele
SALAZAR Ramon
SHIN Wook-Geun
RZEPLINSKI Igor
ARAUJO-ESCALONA Victor
PU
PU CRESTO Federica

HUBERT Philippe
QUENTIN Philippe

CARJAN Nicolae
PRAVIKOFF Michael

ALFAURI Philippe
BAUSSART Jérôme
BORDERES Serge
CADOU Fanny
CARMONA Nadine
CERNA Cédric
CHAMBON Pascale
CHIRON Thierry
CLAVERIE Gerard
DAUDIN Laurent
DEMONCHY Charles Edouard
DEVES Guillaume
DOMANGE Jocelyn
DRUILLOLE Frederic
FAURE Remi
FAVRET Nathalie
FOURNIER Amelie
HELLMUTH Patrick
HUSS Cedric
LACHACINSKI Benoit
LEBLANC Sebastien
LIST Serge
MOREAU Isabelle
MUNOZ Francis
OUTREQUIN Jean
PERARD Sean
PERREVE Sylvie
PIBERNAT Jerome
PLAWINSKI Laurent
REBII Abdelkader
ROCHE Mathieu
ROUDEAU Stephane
SERANI Laurent
SEZNEC Catherine
SORIEUL Stephanie
THOMAS Benjamin
THOMAS Bertrand
VESVRES Marie Helene

LIST Serge
MOREAU Isabelle
MUNOZ Francis
OUTREQUIN Jean
PERARD Sean
PERREVE Sylvie
PIBERNAT Jerome
PLAWINSKI Laurent
REBI Abdelkader
ROCHE Mathieu
ROUDEAU Stephane
SERANI Laurent
SEZNEC Catherine
SORIEUL Stephanie
THOMAS Benjamin
THOMAS Bertrand
VESVRES Marie Helene

UBx
CNRS
UBx
CNRS
CEA
UBx
Bourse Chine
CNRS
CNRS
Non CNRS
UBx

BALANA Arthur
BATAILLE Thierry
BOULET Eric
DE BRITOS BARROS Maria-Albertina
GRIVEAU Isabelle
HABBOUSE Abdelaziz
MESPLES-CARRERE Fabrice

BOUET Raphael
KUNZ Michael

GUEGAN Hervé
LE MINH Quy
RIDARD Benoit

HUBER Arnaud
JOUVE Jean
LE NOBLET Thibaud

2015

GIORDANO Francesco 12 au 16/01 ASTRO	Italie
CARAGIULO Micaela 12 au 16/01 ASTRO	Italie
DI VENERE Leonardo 2 au 16/01 ASTRO	Italie
RUSO Antonio 18/01 au 08/02 NEX	Italie
MEDJADI Djamel Eddine 29/03 au 08/04 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
CESAR John 23/03 au 12/04 NEUTRINO	Venezuela
OURAIBA Mohammed Amin 15/03 au 30/03/15 IPCV	Algérie
TIMKIN Victor 19/04 au 05/07 NEUTRINO	Russie
MEDJADI Djamel Eddine 23/08 au 13/09 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
BARAN Andrzej 12 au 21/11 PHYSIQUE THEORIQUE	Pologne
KISYOV STANIMIR Petrov 12/10 au 23/10 PHYSIQUE THEORIQUE	Bulgarie
MEDJADI Djamel Eddine 06/12 au 20/12 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
TIMKIN Victor 17/10 au 30/11 NEUTRINO	Russie
SAKATA Dosatsu 14/12/15 au 13/12/16 IRIBIO	Japon
EL BAST Mouhamad 01/09 au 30/09 IRIBIO	Liban

2016

SHIROKOV Andrey 09/01 au 12/01 PHYSIQUE THEORIQUE	Russe
TIMKIN Victor 02/04 au 11/06 NEUTRINO	Russe
MIAO He 11 et 12/07 NEUTRINO	
JIE Zhao 11 et 12/07 NEUTRINO	
SCHMIDT Karl-Heinz 8 au 18/03/16 ACEN	Allemagne
MEDJADI Djamel Eddine 19 au 25/10 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
CUCOANES Andi Sebastian 11 au 15/04/16 ENL	
PRITHVI Singh 05/09 au 02/10 IRIBIO	
KISYOV Stanimir 11/04 au 15/04 ENL	

2017

BELOV Oleg 23/04 au 29/04 PHYSIQUE THEORIQUE	Russe
MEDJADI Djamel Eddine 17/09 au 01/10 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
IMADALOU Mourad 19/09 au 24/09 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
MOKRANI Saïda 17/09 au 01/10 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
MUNKHBAATAR Batmunkh 23/04 au 29/04 PHYSIQUE THEORIQUE	Russe
SHIROKOV Andrey 22/05 au 21/06 PHYSIQUE THEORIQUE	Russe

2018

MCALLUM Erin 02/09 au 25/11 ICS	Nouvelle-Zelande
MEDJADI Djamel Eddine 07/10 au 21/10 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
NOR ANITA Binti Rezle 21/09 au 21/10 PHYSIQUE THEORIQUE	Malaisie
NURHAFIZA Binti Mohamad Nor 21/09 au 21/10 PHYSIQUE THEORIQUE	Malaisie
IVANYUK Fedir 18/03 au 25/03 PHYSIQUE THEORIQUE	

2019

MEDJADI Djamel Eddine 31/10 au 10/11 PHYSIQUE THEORIQUE	Algérie
XAYAVONG Latsamy 27/04 au 19/05 PHYSIQUE THEORIQUE	Laos

VISITEURS

Directeur de la publication: Fabrice PIQUEMAL
Graphisme: Fanny CADOU
Imprimeur: Université de Bordeaux



CENTRE D'ÉTUDES NUCLÉAIRES DE BORDEAUX GRADIGNAN

19 chemin du solarium | CS 10120

33175 GRADIGNAN Cedex

+33 5 57 12 08 04

<http://www.cenbg.in2p3.fr>