



## Rapport de prospectives Conseil scientifique de l'IN2P3 Décembre 2018

### **Ont contribué à ce rapport :**

J.C. Angélique, M. Baylac, B. Blank, Y. Blumenfeld, D. Boutigny, E. Clément, W. Da Silva, D. Douillet, D. Duchesneau, B. Farizon, P. Gay, T. Hebbeker, M. Jacobé de Naurois, F. Kapusta, C. Landesman, A. Masiero, P. Manigot, A. Monfardini, C. Renault, M. Ridel, M.-H. Schune, P. Van Duppen, D. Vincent, K. Werner

Le conseil scientifique de l'IN2P3 a examiné lors de sa mandature (01/2015 – 12/2018) la quasi-totalité des axes principaux des activités scientifiques à l'institut. Lors de chaque réunion (trois réunions par an), le CSI a établi un rapport détaillé concernant l'activité scientifique examinée et évaluée. Pour ce faire le CSI a été assisté par des experts du domaine traité, suffisamment indépendants des activités françaises. Les rapports comportent une partie de description de l'activité et une partie « évaluation et recommandations ». Cette dernière partie contient, le cas échéant, des perspectives de la discipline. Le présent rapport de prospectives est largement basé sur les perspectives extraites de ces rapports du CSI. Pour les plus anciens rapports du CSI, une mise à jour a été faite si ceci s'avérait nécessaire.

Les sujets traités au cours du mandat du CSI sont les suivants :

- Physique nucléaire et santé (25 – 26 juin 2015)
- Energie noire (22 – 23 octobre 2015)
- Développement « accélérateurs » (16 – 17 juin 2016)
- Radiochimie (27 – 28 octobre 2016)
- Rayonnements cosmiques (2 – 3 février 2017)
- Upgrades LHC et proposition de participation à BELLE II (22 – 23 juin 2017)
- Physique nucléaire sur les installations de type ISOL : propriétés fondamentales du noyau (26 – 27 octobre 2017)
- Physique hadronique (8 – 9 février 2018)
- Physique des neutrinos (28 – 29 juin 2018)
- Physique des événements rares : Matière noire et décroissance double beta sans neutrino (25 -26 octobre 2018)

Les pages suivantes résument les perspectives dégagées pour les différents domaines à l'IN2P3.

Plus de détails peuvent être trouvés sur les pages web du CSI de l'IN2P3

([http://www.in2p3.fr/actions/conseils\\_scientifiques/conseils.htm](http://www.in2p3.fr/actions/conseils_scientifiques/conseils.htm)).

# Table des matières

---

<b>1. LA PHYSIQUE NUCLEAIRE ET LA SANTE .....</b>	<b>3</b>
1.1. CONTEXTE THEORIQUE ET EXPERIMENTAL .....	3
1.2. PROSPECTIVES .....	5
<b>2. ENERGIE NOIRE .....</b>	<b>7</b>
2.1. CONTEXTE THEORIQUE ET EXPERIMENTAL .....	7
2.2. PROSPECTIVES .....	10
<b>3. DEVELOPPEMENTS « ACCELERATEURS » .....</b>	<b>12</b>
3.1. CONTEXTE .....	12
3.2. PROSPECTIVES .....	15
3.3. CONCLUSIONS .....	19
<b>4. RADIOCHIMIE .....</b>	<b>20</b>
4.1. CONTEXTE .....	20
4.2. PROSPECTIVES .....	26
<b>5. RAYONNEMENTS COSMIQUES .....</b>	<b>28</b>
5.1. CONTEXTE THEORIQUE ET EXPERIMENTAL .....	28
5.2. QUESTIONS SCIENTIFIQUES .....	28
5.3. FEUILLE DE ROUTE EUROPEENNE .....	29
<b>6. UPGRADE LHC ET PARTICIPATION DANS BELLE II .....</b>	<b>34</b>
6.1. CONTEXTE THEORIQUE ET EXPERIMENTAL: .....	34
6.2. PROSPECTIVES .....	37
<b>7. PHYSIQUE NUCLEAIRE SUR DES INSTALLATIONS DE TYPE ISOL .....</b>	<b>38</b>
7.1. CONTEXTE THEORIQUE ET EXPERIMENTAL .....	38
7.2. PROSPECTIVE .....	41
<b>8. PHYSIQUE HADRONIQUE .....</b>	<b>45</b>
8.1. CONTEXTE .....	45
8.2. INFRASTRUCTURES : SITUATION EN EUROPE ET AU NIVEAU INTERNATIONAL .....	47
8.3. COLLISIONS D'IONS LOURDS DANS L'EXPERIENCE ALICE AU LHC .....	48
8.4. COLLISIONS D'IONS LOURDS DANS L'EXPERIENCE CMS AU LHC .....	50
8.5. COLLISIONS D'IONS LOURDS DANS L'EXPERIENCE LHCb AU LHC .....	51
8.6. PHYSIQUE HADRONIQUE A JEFFERSON LAB .....	52
8.7. PHYSIQUE HADRONIQUE A GSI/FAIR .....	53
8.8. PROSPECTIVES .....	54
<b>9. LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS .....</b>	<b>57</b>
9.1. CONTEXTE EXPERIMENTAL ET THEORIQUE .....	57
9.2. PROSPECTIVES .....	61
<b>10. LA MATIERE NOIRE ET LA DOUBLE DESINTEGRATION BETA SANS NEUTRINO : LA PHYSIQUE DES EVENEMENTS RARES .....</b>	<b>63</b>
10.1. INTRODUCTION .....	63
10.2. PERSPECTIVES .....	67
<b>11. CONCLUSION .....</b>	<b>69</b>

# 1. La physique nucléaire et la santé

## 1.1. Contexte théorique et expérimental

La hadronthérapie est une technique de traitement du cancer fondée sur l'utilisation de particules (protons et ions légers), particulièrement adaptée aux tumeurs cancéreuses radio-résistantes ou placées à des endroits sensibles comme en neurologie ou ophtalmologie. Cette méthode présente des avantages biologiques avec une efficacité biologique relative (EBR) élevée, autant que physiques (pic de Bragg) permettant une meilleure balistique par rapport à la radiothérapie conventionnelle (rayons X). La protonthérapie est utilisée cliniquement depuis les années 1990. Il existe dans le monde environ cinquante centres de traitement en protonthérapie, dont trois en France : le Centre de protonthérapie d'Orsay (CPO) et le Centre Antoine Lacassagne à Nice (CAL Nice) et depuis juillet 2018, le centre Archade à Caen. Le développement de la carbone-thérapie est plus récent et a réellement pris son essor au début des années 2000. Il existe, actuellement treize centres de traitements opérationnels dans le monde, dont sept au Japon, deux en Chine, deux en Allemagne et un en Autriche et en Italie. Chaque année, le cancer touche 384 000 nouveaux patients en France. Parmi eux, 150 000 sont traités par radiothérapie, seule ou associée à la chimiothérapie ou à la chirurgie. En 2015, plus de 106 000 patients ont été traités par protonthérapie et 13 000 par carbone-thérapie. En France, il ne subsiste encore aujourd'hui, qu'un projet, le centre de recherches Archade, le projet ETOILE de centre de traitement ayant été gelé.

Les compétences techniques et scientifiques de l'IN2P3 ont conduit certains de ses laboratoires à s'impliquer dans cette thématique. Leurs équipes peuvent en particulier apporter un savoir-faire dans les domaines de l'instrumentation, de la détection des rayonnements et particules chargées, du monitoring du faisceau, de l'imagerie, de la simulation des interactions et de la prédiction de la dose, ainsi que des développements dans le domaine des accélérateurs.

Au niveau national, à la demande de l'IN2P3, une dizaine de laboratoires de l'institut se sont regroupés en 2004, pour constituer un groupement de recherche : le GDR MI2B « outils et méthodes nucléaires pour la lutte contre le cancer ». Au niveau européen, le réseau Enlight (European Network for Research in Light Ion Therapy) a été mis en place en 2001 par l'ESTRO (European Society for Therapeutic Radiology and Oncology) et l'EORTC (European Organisation for Research and Treatment of Cancer), en collaboration avec le CERN. Les objectifs de ce réseau sont de coordonner les projets sur le plan technologique, médical et économique, avec un objectif de réduction des coûts.

En 2012, la recherche en hadronthérapie en France s'est structurée autour du projet « France Hadron » qui regroupe les différentes équipes françaises en médecine, en biologie et en physique impliquées dans les thématiques de la hadronthérapie. France Hadron est actuellement représentée par cinq nœuds : Orsay, Nice, Caen, Toulouse et Lyon. D'autre part, en Rhône-Alpes Auvergne, l'IN2P3 a une forte implication dans le Labex Primes (Physique, radiobiologie, imagerie médicale et simulations) qui inclut la hadronthérapie et le développement de thérapies innovantes utilisant le rayonnement synchrotron (photo activation d'éléments lourds et de nanoparticules et radiothérapie micro faisceaux). À ceci peuvent s'ajouter des initiatives locales stimulées par une politique régionale.

L'implication de l'IN2P3 dans la thématique de recherche sur la hadronthérapie s'articule autour de deux grands thèmes de R&D que sont les accélérateurs mis en place pour produire

les faisceaux de protons et d'ions légers, et les équipements adossés aux plateformes de recherche en amont et de recherche clinique. Un troisième thème transverse concerne les moyens et les méthodes de simulations numériques associées.

En 2015, plusieurs initiatives et projets scientifiques ont émergés autour de cette thématique, que ce soit au niveau national ou européen. Il est important que face à l'émergence de ces différents projets, l'institut dégage une stratégie sur sa contribution aux différents programmes proposés, et une structuration adéquate des communautés concernées. La direction de l'IN2P3 a ainsi sollicité l'avis de son Conseil scientifique pour évaluer la thématique de recherche sur la hadronthérapie. Trois projets ont été présentés au conseil scientifique de juin 2015:

- **Archade (Caen)** : Archade (Advanced Resources Center for HADrontherapy in Europe) est un centre dont la vocation est de mener des recherches à l'interface physique et médecine, que ne permettent pas de réaliser actuellement les centres de traitements, monopolisés par les activités cliniques. La légitimité de ce centre est réelle. L'état des lieux du programme de recherche présenté montre une activité expérimentale foisonnante concernant la détermination de sections efficaces doublement différentielles de particules secondaires, le contrôle faisceau, le contrôle balistique et dosimétrique, les techniques d'imagerie facilitant la planification ou le contrôle du traitement, ou encore la simulation des traitements.
- **ProtoBeamLine (CAL Nice)** : ProtoBeamLine se propose d'exploiter l'installation munie d'une ligne de faisceau dédiée à la R&D en protonthérapie disponible en France. Ceci représente une opportunité intéressante au vu de la difficulté reconnue pour les équipes de mettre en œuvre leurs équipements sous faisceaux dans les installations de hadronthérapie françaises dédiées au traitement. La force du projet présenté par le CAL est de proposer une large gamme d'énergies (70 à 230 MeV) de protons dont les effets radiobiologiques sont du plus grand intérêt clinique. On peut regretter qu'il n'y ait pas d'espace dédié à la radiobiologie, mais seulement pour les expériences de physique.
- **OPENMED (CERN)** : En lien avec une structuration de la recherche autour des radiothérapies innovantes en Rhône-Alpes et Auvergne (RAA). Le groupe CERN Medical Applications a été constitué en 2014, sous la direction de Steve Myers. Il a en particulier été décidé de créer une plateforme « BioLEIR Biomedical Facility », maintenant appelée « OPENMED » qui fournira des faisceaux d'ions de différentes espèces et énergies aux utilisateurs extérieurs en radiobiologie et développements de détecteurs. L'un des objectifs principaux du projet est d'utiliser l'anneau LEIR pour fournir des faisceaux d'ions dans des lignes permettant de réaliser des expériences de radiobiologie ou des tests de détecteurs. On notera aussi que le projet a pour but de concevoir un nouvel accélérateur compact, au coût optimisé, utilisant les technologies les plus avancées.

A l'issue de ces présentations, le conseil a attiré l'attention de l'IN2P3 sur le fait que l'absence de hiérarchisation des axes de recherche et des objectifs à atteindre compte tenu des moyens disponibles est préjudiciable, car elle conduit à une démultiplication d'efforts certes pertinents, mais dispersés, nuisant *in fine* à la lisibilité de la communauté. D'une manière générale, le conseil a insisté sur l'importance de fédérer, d'établir et d'afficher les priorités et les objectifs de la communauté scientifique de l'IN2P3 dans ses recherches et si possible de

les planifier. Il a recommandé à l'institut de s'appuyer sur le GDR MI2B pour atteindre ces objectifs. Le conseil a notamment remarqué que les projets examinés avaient des échelles de temps différentes et complémentaires : il a suggéré une fédération et un enchaînement des efforts. Enfin, il a recommandé d'exploiter le potentiel des machines locales pour obtenir une cohérence nationale puis assurer une visibilité à l'international. On pourra se reporter au rapport détaillé de ce conseil scientifique de Juin 2015 pour connaître plus précisément les avis et recommandations émis pour chacun des programmes de recherche examinés.

## 1.2. Prospectives

Nous présentons ci-après les principaux faits marquants qui se sont produits depuis le conseil scientifique de juin 2015 et les prévisions futures en espérant ne rien avoir oublié d'important et ne pas avoir déformé les informations.

France-Hadron a été arrêté fin 2016 en tant que projet d'Infrastructure Nationale, et les investissements et le soutien aux expérimentations se sont interrompus. L'arrêt du financement public de France-Hadron a été effectif au 31 janvier 2017. L'arrêt du financement ne signifie pas l'arrêt de France-Hadron. Jacques Balosso, ancien coordonnateur du projet, envisage de faire exister France Hadron comme une association du même type que la SFP.

Concernant **Archade (Caen)**, la première phase de construction du projet, qui concerne le centre de traitement proton appelé Cyclhad (CyCLOtrons pour l'HADronthérapie) a été inaugurée le 5 juillet 2018. L'objectif de Cyclhad est de traiter 345 patients par an. Cyclhad, avec le Centre de protonthérapie de l'Institut Curie à Orsay et le Centre Antoine-Lacassagne à Nice permet d'augmenter les capacités de traitement proton en France. L'objectif d'Archade est le développement, à partir de la fin 2018, d'un second accélérateur dédié à la carbonothérapie, le C400, pour un démarrage, à partir de 2023.

Concernant **ProtoBeamLine (CAL Nice)**, une négociation est en cours pour signer entre le CAL à Nice et l'IN2P3 une convention de collaboration pour l'accueil des équipes de l'IN2P3 et bénéficier de temps de faisceau sur la ligne à basse énergie (Medicyc proton 65 MeV). On peut rappeler que le détecteur du LP Clermont est installé en permanence sur cette ligne. Le CAL a provisionné 1.2 M€ pour finaliser une ligne de recherche dédiée à haute énergie (proton 230 MeV) utilisant le ProteusONE comme source de faisceau, ainsi qu'une ligne parallèle à la ligne de traitement. Il y a clairement la volonté de la direction du CAL Nice de faire de leur site ouest un pôle de recherche aussi bien régional (PACA) que national. Par ailleurs, le Centre Proton d'Orsay (CPO), a également adapté ses infrastructures pour permettre une activité de recherche mais plutôt avec une orientation Radiobiologie.

Concernant **OPENMED (CERN)**, la nouvelle direction générale du CERN a changé la politique vis à vis des applications médicales, en recentrant ses moyens humains, techniques et financiers sur le "coeur de métier" du LHC, avec une priorité pour les upgrades. En conséquence, les applications sociétales sont vues principalement sous un angle de valorisation et de dissémination. On pourra notamment sur le site web <https://kt.cern/cern-medtech-strategy> consulter un document de juin 2017 intitulé: « Strategy and framework applicable to knowledge transfer by CERN for the benefit of medical applications » et directement accessible au format pdf avec le lien suivant : <https://cds.cern.ch/record/2271003/files/English.pdf>.

Concernant le **Noeud Rhône-Alpes Auvergne (RAA)** issu du projet ETOILE, et qui a été fondateur de l'infrastructure France Hadron, il regroupe, pour l'IN2P3, les labos LPC-Clermont, IPNL, LPSC (et CPPM dans une moindre mesure), ainsi que des labos d'imagerie et de radiobiologie. On peut rappeler que les axes de recherche en lien avec l'hadronthérapie menés dans ce nœud sont:

- l'expérimentation en radiobiologie, notamment avec les protons de 3 MeV de la plateforme Radiograaff de l'IPNL. Le projet IBEX de renouvellement de l'accélérateur (présenté en 2015) n'a pas encore été financé;
- la modélisation en radiobiologie, avec le développement de modèles visant à être intégrés dans les futurs plans de traitement;
- le développement d'une instrumentation pour le contrôle en ligne des traitements, avec en particulier la collaboration CLaRyS pour le contrôle du parcours par rayonnements secondaires.

Ces trois axes sont intégrés dans la stratégie du GDR MI2B. Ils ont également trouvé leur place dans le schéma des master-projets mis en place par la direction de l'Institut.

France Hadron ayant été arrêté fin 2016 en tant que projet d'Infrastructure Nationale, les investissements et le soutien aux expérimentations se sont interrompus. Aujourd'hui, le nœud RAA n'a plus d'existence formelle autrement qu'au sein du LabEx PRIMES (Physique, Radiobiologie, Imagerie Médicale et Simulations), et de collaborations régionales telles que CLaRyS (Contrôle en Ligne de l'hadronthérapie par Rayonnements Secondaires) dont le périmètre s'étend aux radiothérapies innovantes (utilisant par exemple le rayonnement synchrotron et des particules/nanoparticules radiosensibilisantes). Le LabEx vient de remettre un bilan scientifique et un projet de prolongation jusqu'en 2024 en cours d'évaluation. On peut noter que les autorités qui ont été amenées à soutenir le projet de renouvellement du LabEx, dont l'IN2P3, ont souligné la qualité et le niveau de la production scientifique et la capacité des équipes à lever des fonds complémentaires.

En conclusion, aujourd'hui, avec plus de 12 laboratoires impliqués dans des thématiques scientifiques liées à la santé, associés à des plateformes expérimentales de pointe, l'IN2P3 contribue à l'avancée des technologies et connaissances dans le domaine du nucléaire lié à la santé. Les défis actuels auxquels les équipes de l'institut participent ont pour objectifs principaux de diagnostiquer précocement les maladies et de proposer des thérapies de plus en plus personnalisées. Afin de garder une cohérence nationale et une ambition commune, le GdR « Outils et méthodes nucléaires pour la lutte contre le cancer » (MI2B) accompagne l'IN2P3 en animant la communauté et en proposant des réflexions afin de promouvoir de nouvelles approches méthodologiques et instrumentales dans le domaine du nucléaire-santé pour le diagnostic et la thérapie. Par son rôle fédérateur, le GdR doit susciter l'émergence de nouveaux projets collaboratifs dépassant les frontières de l'IN2P3. Le GdR est actuellement organisé en quatre pôles thématiques (un pôle imagerie, un pôle thérapie, un pôle radionucléide et un pôle radiobiologie) animés par un comité de pilotage. Ces axes de recherche nécessitent l'intégration obligatoire dans des programmes de recherche multidisciplinaires des activités de l'IN2P3 (théorie, simulation/modélisation, dosimétrie, imageries multimodales, détection, irradiation, caractérisation physico-chimiques,...) et donc d'établir des liens entre les différentes institutions comme CNRS/INSB, CNRS/INC, INSERM, IRSN, INRIA, AVIESAN, sociétés savantes...

## 2. Energie noire

### 2.1. Contexte théorique et expérimental

La cosmologie est probablement à un moment clef de son évolution. Le modèle standard de la cosmologie, appelé aussi modèle de concordance, décrit fidèlement le contenu et la dynamique de l'univers, en accord avec l'ensemble des nombreuses observables. Avec seulement six paramètres libres, aujourd'hui connus avec une précision de l'ordre du pour cent, il rend compte de l'évolution des structures, depuis les fluctuations quantiques environ  $10^{-30}$  seconde après le Big-Bang, jusqu'aux galaxies et amas de galaxies visibles 13,8 milliards d'années plus tard. Les résultats définitifs de la mission Planck dédiée à l'étude du rayonnement fossile attestent de la robustesse de ce modèle pour décrire l'univers primordial.

L'énergie noire dicte l'expansion de l'espace depuis quelques milliards d'années. Si elle peut certes s'interpréter comme une simple constante cosmologique dans le cadre de la relativité générale, elle échappe à toute compréhension « physique ». Le modèle standard de la physique des particules ne semble d'aucune aide pour la comprendre, et il n'explique ni l'inflation primordiale, ni la matière noire. La précision des mesures aujourd'hui disponibles conduit à l'observation de certaines tensions entre l'extrapolation des six paramètres de base jusqu'à l'univers contemporain et les mesures directement faites sur des objets évolués quelques dix milliards d'années plus tard. L'origine de ces faibles désaccords, sur la constante de Hubble  $H_0$  en particulier, est peut-être une combinaison d'effets systématiques instrumentaux et astrophysiques. Ou ce pourrait être le signe d'une nouvelle physique, liée à l'énergie noire au sens le plus large, qui devient visible au fur et à mesure de l'expansion de l'espace.

Plusieurs champs restent à explorer finement et ouvrent de nouvelles voies. L'observation des modes B de polarisation du rayonnement fossile est sans doute l'accès unique à l'échelle d'énergie de l'inflation et à la physique de cette époque, avant même la création de la matière. Les âges sombres, soit les premières centaines de millions d'années après la séparation entre la matière et le rayonnement, ne seront directement observables qu'à l'aide de radiotélescopes mesurant la raie à 21 cm de l'hydrogène fortement décalée vers le rouge, en dressant le spectre des fluctuations de matière avant l'allumage des premières étoiles. Enfin, plusieurs sondes astrophysiques donnent accès à notre univers sur les dix derniers milliards d'années, soit jusqu'à des *redshifts* inférieurs à 2. Ces sondes sont notamment la cartographie à trois dimensions des galaxies, le cisaillement gravitationnel, le lentillage gravitationnel fort, les amas de galaxies et les supernovae. L'évolution de la distribution de matière et l'histoire de l'expansion, si elles sont mesurées précisément, permettront de tester aux plus grandes échelles notre théorie de la gravitation et d'affiner notre connaissance des propriétés de la matière et d'énergie noires. LSST et Euclid sont deux projets majeurs conçus pour apporter des informations uniques sur la nature de l'énergie noire et mieux comprendre l'origine de l'accélération de l'expansion de l'univers. Les deux projets vont utiliser les quatre sondes citées précédemment.

**LSST** est un projet dirigé par les États-Unis, dans lequel les équipes de l'IN2P3 ont des contributions techniques importantes. LSST est un télescope au sol de 8,4 m de diamètre muni d'une caméra CCD de 3,2 gigapixels avec un champ de vue de 10 degrés-carré. Il fera un sondage optique à large champ (25 000 degrés-carré dont 18 000 pour le relevé cosmologique principal) de manière systématique et répétée pendant dix ans, garantissant une résolution angulaire et une précision photométrique excellentes. Ce sondage permettra d'étudier les effets de lentille gravitationnelle dans les régimes fort et faible, l'évolution des grandes

structures avec un catalogue de plusieurs milliards de galaxies et de détecter des centaines de milliers de supernovæ.

L'IN2P3 est impliqué dans la préparation de LSST depuis une dizaine d'années et le seul participant international à financer sa participation par une contribution *in-kind*. Les contributions techniques de l'IN2P3 sont majeures avec l'électronique de lecture de la caméra et sa caractérisation (banc optique), les filtres et leur système de changement, ainsi que le *slow control*. Huit laboratoires sont impliqués, avec plus d'une centaine de personnes. L'assemblage de la caméra à SLAC est en cours et suit le calendrier prévu. La validation technique puis scientifique de l'instrument (télescope + caméra) devrait commencer dès 2020, pour un début du sondage en 2022 pour une durée de 10 à 12 ans.

S'ajoute à cela une contribution significative à la gestion et au traitement des données. Le CC-IN2P3 s'est engagé à déployer et à mettre en œuvre une infrastructure de calcul et de stockage en vue du traitement de 50% des données de LSST en collaboration avec le National Center for Supercomputing Application (NCSA) aux États-Unis. L'accord prévoit également la mise à disposition d'une copie intégrale des données au CC-IN2P3 (données brutes + catalogues produits) ainsi que 45 droits d'accès aux données pour la France (non restreints à l'IN2P3).

La contribution à la science se fait au travers de la *Dark Energy Science Collaboration* créée en 2012. Parmi ses 822 chercheurs (192 membres "pleins") 76 (29 membres "pleins") viennent de l'IN2P3. Le nombre de physiciens IN2P3 augmente fortement, de 14 à 25 FTE de 2014 à 2018.

**Euclid** est un projet de télescope spatial de 1,2 m de diamètre pourvu de deux instruments à grand champ, destiné à mesurer les amas galactiques, les BAO et le cisaillement gravitationnel, entre autres. Le télescope utilisera deux techniques : la spectrométrie en proche infrarouge et la photométrie dans le visible. Les spectres de galaxies pourront atteindre un *redshift* de l'ordre de 2. Le sondage profond produira l'imagerie de quasars jusqu'à des *redshifts* de 7-10. Sélectionné par l'ESA en 2012, Euclid doit être envoyé dans l'espace en 2022 depuis le port spatial de Kourou.

Les contributions techniques de l'IN2P3 sont importantes et concernent les détecteurs infrarouges de l'instrument NISP avec intégration sur le plan focal, caractérisation, étalonnage, tenue aux radiations. S'ajoutent une implication dans le segment sol et le développement des logiciels. Une participation conséquente au traitement des données est prévue avec le CC-IN2P3 pour fournir des moyens de production s'élevant à 30 % des besoins d'Euclid pour la première production de données.

La contribution française au consortium Euclid représente à peu près un tiers de l'investissement total. Y participent plus de 250 membres de laboratoires français, dont environ 50 appartenant à cinq laboratoires de l'IN2P3, sur un total d'un millier de chercheurs.

Du côté de la science, il existe à l'IN2P3 une expertise scientifique qui s'appuie sur l'expérience acquise dans d'autres projets comme Planck, eBOSS pour les BAO, ou encore SNLS et SNfactory pour les supernovæ. La communauté s'est cependant organisée autour de trois thèmes : les sondes cosmologiques : *weak lensing*, *clustering*, amas de galaxies ; la combinaison des sondes cosmologiques ; la formation et évolution des galaxies.

Pour tirer au mieux parti des potentiels scientifiques de LSST et Euclid, il est important de considérer des **projets intermédiaires** d'ici 2022. Ils permettent non seulement de se préparer à la physique, mais aussi de réaliser un certain nombre d'études cosmologiques avec des données réelles.

Deux catégories de projets peuvent être distinguées, correspondant aux deux techniques d'observation : imagerie visible et spectrométrie. En ce qui concerne l'imagerie, les chercheurs de l'IN2P3 se sont investis sur deux sujets principaux. Le premier concerne les supernovæ de type Ia, avec pour objectif d'étendre le diagramme de Hubble à des *redshifts* plus élevés, typiquement au-delà de 0,8. L'instrument est le télescope Subaru de 8,2 m équipé de la caméra HSC (Hyper Suprime Camera). L'analyse est en cours. Le second est l'utilisation du cisaillement gravitationnel pour étalonner les méthodes d'estimation des masses des amas de galaxies. Les projets concernés sont CFHT/Megacam et Subaru/HSC. Cette étude touche deux aspects clefs des projets LSST et Euclid que sont le cisaillement gravitationnel et les *redshifts* photométriques. La spectroscopie est représentée par les projets SDSS/eBOSS et DESI pour l'étude de BAO (oscillations acoustiques de baryons). Les BAO sont une sonde incontournable pour la physique de l'énergie noire et complémentaire aux supernovæ de type Ia car plus performante pour des *redshifts* plus élevés, notamment avec l'étude des forêts Lyman-alpha des quasars. Le projet SDSS/eBOSS est une version étendue du sondage spectroscopique des galaxies et quasars effectué par BOSS. Le sondage a démarré en 2014 et devrait s'achever en 2020. C'est une collaboration internationale à majorité américaine. Le projet DESI, essentiellement américain lui aussi, est la suite logique de BOSS/eBOSS. Le démarrage de sa prise de données est prévu pour 2019 pour une durée de 5 ans. Il est bien complémentaire de LSST et Euclid en ce qui concerne les sondes BAO et les distorsions dans l'espace des *redshifts*.

L'étude des **BAO par détection en radio** de l'émission à 21 cm de l'hydrogène interstellaire neutre (HI) semble être une technique prometteuse et complémentaire des autres sondes cosmologiques. Suite à des prédictions théoriques, la détection est tentée depuis 2006-2007 par plusieurs équipes dans le monde : projets CHIME, TianLai, HIRAX, BINGO..., les deux premiers étant les plus avancés. Le but est de mesurer des cartes d'intensité de HI avec une résolution d'une dizaine de minutes d'arc et d'y chercher par corrélation la signature des BAO. La fréquence de détection de la raie à 21 cm correspond au *redshift* ( $z$ ) de la source. La grande résolution en  $z$  des mesures radio les rend sensibles aux distorsions dans l'espace des *redshifts*.

Le consortium français s'est positionné sur l'instrument chinois TianLai (plus une faible implication en parallèle dans HIRAX en Afrique du Sud), et développe l'expertise instrumentale correspondante sur le démonstrateur PAON-4 à Nançay. Les expériences BAO radio présentent des avantages importants en matière de coût et donne la possibilité d'accéder à des grands  $z$  avec des instruments de grande taille. Toutefois, un certain nombre de difficultés techniques subsistent et une première détection n'a pas encore été obtenue (sauf en corrélation avec des observations optiques). La soustraction de la contribution des avant-plans est délicate mais l'expertise acquise sur Planck et LOFAR-EoR devrait pouvoir être exploitée. Enfin, compte-tenu des faibles intensités d'émission radio, la détection de l'émission individuelle des galaxies à 21 cm n'est envisageable que pour des objets proches avec les instruments actuels ; le projet SKA (Square Kilometre Array) permettra de repousser cette limite et permettra l'observation des galaxies riches en gaz jusqu'à  $z > 1$ . Ce radiotélescope sera de par sa taille cinquante fois plus sensible que les instruments actuels. Ses objectifs scientifiques sont multiples et incluent les BAO radio. En raison du très grand volume de

données, SKA représente un défi sans précédent en termes de traitement et de gestion des données.

L'intérêt de l'utilisation du **rayonnement fossile** comme outil d'investigation cosmologique a été pleinement démontré ces dernières années. Plusieurs projets existent aujourd'hui. En ce qui concerne PolarBear et Simons Array, la participation de l'IN2P3 à ces projets américains au sol reste limitée à l'exploitation scientifique et à quelques individus. L'instrument NIKA2, développé sur la période 2013-15 par une collaboration essentiellement française avec une forte implication du LPSC, est opérationnel depuis octobre 2015 au télescope de 30 m de l'IRAM, dans la Sierra Nevada en Espagne. Le groupe porte un large programme cosmologique avec la cartographie détaillée de 50 amas distants. L'expérience QUBIC est pilotée par l'IN2P3 avec pour objectif ambitieux la détection (ou au moins l'apposition de contraintes sévères) des modes B primordiaux. Enfin, la communauté concentre ses efforts de R&D sur la technologie des Kinetic Inductance Detectors (KID).

À plus long terme est envisagé un satellite post-Planck. La participation au satellite japonais LiteBird pourrait être conséquente, avec un rôle majeur sur l'instrument européen embarqué. Le projet est en attente d'une sélection définitive par la JAXA ; le lancement est prévu en 2028. Un projet dédié à la spectroscopie fine du rayonnement fossile, dans la lignée de COBE, est en cours d'étude. Une participation à CMB-S4, le plan américain de coordination des efforts d'étude du CMB au sol, dont la quête principale est la détection des modes B est envisagée. Cette implication serait la suite logique de la participation à l'analyse des données de PolarBear. Le potentiel de ce programme est énorme. La quête des modes B au sol doit être secondée par des mesures à hautes fréquences qui ne peuvent être réalisées qu'au-dessus de l'atmosphère (celle-ci étant quasiment opaque au-delà de 300 GHz). Ces mesures sont pertinentes avant le lancement d'un nouveau satellite. Les États-Unis mènent ici encore un certain nombre de programmes. Si un projet de ballon essentiellement français a été abandonné, la participation au projet IDS avec un vol en 2022 depuis l'Antarctique est acceptée.

## 2.2. Prospectives

La communauté scientifique française est aujourd'hui fortement engagée dans deux projets de taille : Euclid et LSST, qu'il s'agit de soutenir de façon continue et cohérente. Les contributions à Euclid sont financées par le CNES et les équipes majoritairement issues de l'INSU et du CEA, alors que l'IN2P3 est moteur dans LSST. Les deux projets sont actuellement en phase finale de développement et vont commencer à prendre des données en 2022. Les équipes de l'IN2P3 sont fortement impliquées dans des développements techniques, ce qui devrait leur permettre de prendre une place de premier choix dans l'exploitation de ces instruments. Des projets intermédiaires, s'appuyant notamment sur les données des instruments Subaru/(Hyper)SuprimeCam et CFHT/Megacam pour l'imagerie, ainsi que SDSS/eBOSS pour la spectroscopie, ont partiellement vocation à préparer Euclid et LSST.

Pour maximiser le retour scientifique de ces projets, les équipes doivent s'engager dès maintenant dans des activités fortes de préparation de la science sur le volet cosmologie avec un effort tout particulier sur la valorisation de la compétence existante dans le domaine des supernovæ ; le développement des compétences dans le domaine du cisaillement gravitationnel ; la valorisation de l'expertise acquise sur Planck et NIKA/NIKA2 dans le domaine des amas de galaxies. Avec la maîtrise démontrée des techniques d'imagerie ainsi qu'un effort coordonné existant actuellement sur la reconstruction photométrique de la distance, les équipes de l'IN2P3 ont des atouts à faire valoir. Il faut veiller à ce qu'un nombre

suffisant de physicien(ne)s soit impliqué dans le cisaillement gravitationnel, probablement la sonde la plus compétitive pour l'énergie noire.

Concernant Euclid, des groupes de l'IN2P3 s'orientent sur un programme supernovæ, grandes structures et amas de galaxies. Il n'y a pas de groupe actuellement positionné sur des études de cisaillement gravitationnel, sujet à fort potentiel. On peut noter que le programme supernovæ ne fait pas actuellement partie de la mission d'Euclid minimale, alors que le cisaillement gravitationnel et les grandes structures feront partie du sondage principal. Il ne faudrait pas passer à côté de ces deux programmes extrêmement prometteurs. Les collaborations avec des experts de ces sujets, en dehors de l'IN2P3, sont plus que souhaitables. Le colloque français annuel Dark Energy est un lieu efficace d'échanges entre les communautés, il doit être pérennisé.

La préparation avec des données réelles, qui peuvent être publiques, mais également fournies par des projets intermédiaires, est essentielle. Le besoin de former dès maintenant les physiciens IN2P3 pour les analyses futures de LSST et Euclid à l'horizon de 2020 est bien réel. Il est important d'articuler les deux grands projets avec les projets intermédiaires, y compris DESI, pour que les équipes puissent avoir des interactions fortes avec le monde de la cosmologie. Il est nécessaire d'assurer une formation sur les deux axes d'analyse que sont la spectroscopie et l'imagerie, cette dernière regroupant actuellement un peu plus de personnes à l'IN2P3. À cette fin, eBOSS pourrait permettre dans un premier temps d'acquérir de l'expertise dans les analyses spectroscopiques qui seront une partie du programme scientifique d'Euclid. Une opération scientifique ciblée s'appuyant sur les expertises existantes est un bon mode de participation au projet DESI.

LSST et Euclid sont donc des projets complémentaires avec d'importants engagements techniques de l'IN2P3, de très bons niveaux en instrumentation et en traitement des données. Ces contributions très visibles et sans risque identifié doivent être clairement soutenues pour garantir leurs succès. Pour le plus long terme, une partie de la communauté américaine souhaite voir aboutir le projet de télescope spatial infrarouge à grand champ WFIRST qui viendrait étendre les mesures de LSST et Euclid. Étant donné l'apport qu'aurait WFIRST pour la cosmologie, il serait souhaitable de maintenir des contacts avec les équipes US afin de pouvoir positionner un groupe français si le projet se concrétise.

Les équipes IN2P3 ont acquis ces dernières années de l'expertise dans le domaine de la détection radioastronomique et la recherche des BAO radio est un sujet important. En raison de l'aspect exploratoire de cette recherche, il est important de ne pas fermer d'options trop tôt. Toutefois, compte-tenu de la petite taille de l'équipe, il convient de se focaliser sur un nombre restreint de sujets et de mettre en valeur ses compétences reconnues en traitement électronique des signaux. Le très grand et futur instrument SKA offre des possibilités intéressantes pour les BAO radio, notamment pour accéder aux grands *redshifts*. La participation française à SKA reste pourtant clairsemée. Il est important de s'appuyer sur les instruments radio BAO pour contribuer aux discussions en vue de l'optimisation de l'instrument SKA.

Après la mission Planck, les équipes de l'IN2P3 se sont lancées dans divers projets. Le *Large program* sur les amas de galaxies distants se poursuit avec NIKA2 et permettra d'utiliser pleinement le potentiel des amas comme sonde cosmologique avec Euclid et LSST. En ce qui concerne l'instrumentation, un groupe de travail interorganismes a été créé afin de définir une feuille de route sur la partie détecteur et chaîne de détection dans la gamme allant de l'infrarouge lointain au millimétrique pour proposer, entre autres, un plan de travail pour la

préparation d'une mission consacrée à la mesure de la polarisation du CMB. De façon similaire, une feuille de route sur le rayonnement fossile doit établir les éléments d'une stratégie incluant les aspects sol et spatiaux (y compris ballon), en s'appuyant sur la feuille de route des détecteurs (sub)millimétriques, et en intégrant la réflexion européenne. Le projet le plus avancé est sans doute celui d'une participation française substantielle à l'instrument haute fréquence confiée à l'Europe à bord du satellite japonais LiteBird. La décision attendue début 2019 appartient à l'agence spatiale japonaise. Les rapports définitifs des feuilles de route sont attendus fin 2018.

### **3. Développements « accélérateurs »**

#### **3.1. Contexte**

Dans la thématique des accélérateurs de particules, les objectifs de recherche se déclinent selon quatre axes principaux :

- L'augmentation d'intensité, de luminosité,
- L'augmentation d'énergie, de gradient,
- L'augmentation de la fiabilité,
- L'accessibilité des machines pour la société.

Afin d'adresser ces objectifs, la stratégie de l'IN2P3 vise à maintenir un programme de R&D ambitieux, adossé à des plateformes technologiques associées, participer aux développements et constructions de machines de nouvelle génération, proposer des solutions innovantes pour différentes applications (ADS, source X compacte) et renforcer les partenariats (CERN, ..).

Les activités de recherche et développement concernent les thématiques suivantes :

- Les cavités accélératrices supraconductrices et la cryogénie,
- Les sources d'ions et d'électrons,
- Les ensembles dits cible/sources pour faisceaux radioactifs,
- La dynamique des faisceaux, notamment pour le « final focus »,
- L'accélération laser plasma,
- L'instrumentation faisceau,
- Les technologies associées (RF, vide...).

Les travaux liés aux accélérateurs concernent douze laboratoires de l'IN2P3 et 320 équivalents temps-plein (ETP), dont une vingtaine de chercheurs, d'après un relevé fait sur la base de données ISIS en 2014. Depuis 2007, dix jeunes chercheurs ont été recrutés sur cette thématique.

Les ressources humaines de la discipline se répartissent ainsi :

- Le fonctionnement des plateformes existantes mobilise un quart des forces dédiées à la thématique (80 ETP),
- La production et l'accélération d'ions lourds, pour nourrir en particulier les expériences de physique nucléaire, concernent les accélérateurs de deux laboratoires : ALTO à l'IPN d'Orsay (20 ETP) et le GANIL à Caen (130 ETP dont 90 dédiés au projet SPIRAL2),
- L'augmentation des performances pour les accélérateurs du futur est recherchée à travers les cavités supraconductrices (10 ETP), les accélérateurs linéaires de forte

puissance et les ADS (25 ETP) dont MYRRHA, l'accélération laser-plasma (10 ETP) et diverses activités sur les collisionneurs (15 ETP).

- Les machines à électrons de forte luminosité sont développées à des fins variées, autant fondamentales que sociétales (30 ETP).

Au niveau national, les liens de ces activités sont évidemment forts avec le CEA — le service des accélérateurs de l'IRFU est constitué de 130 personnes et le CEA fournit 80 ETP au GANIL —, les sociétés civiles d'accélérateurs (ESRF, SOLEIL), plusieurs universités et l'industrie (GIS avec Thales-ED...). Aux niveaux européen et international, les partenaires sont nombreux (CERN, DESY, GSI, INFN, SCK-CEN...) et des programmes européens financent plusieurs aspects de la thématique.

Il est à noter que le conseil scientifique de juin 2016 fût le premier à passer en revue les activités de l'IN2P3 concernant les accélérateurs dans leur ensemble.

### **R&D photo-injecteurs et sources Compton - LAL**

Trois projets sont menés parallèlement : la R&D sur le photo-injecteur PHIL, les développements de la source compacte ThomX et de la source gamma ELI-NP. **PHIL**, basé sur un photo-injecteur à 5 MeV, est une plateforme de R&D pour les photo-injecteurs et de soutien pour les développements d'autres projets de la vallée d'Orsay (ThomX, PRAE ou ESCULAP). **ThomX** est une source compacte de rayons X, basée sur la diffusion Thomson, composée d'un photo-injecteur à 50 MeV, d'une section accélératrice, d'un anneau de stockage et d'une source de photons. La source de photons est un laser amplifié par une cavité Fabry-Pérot de haute finesse. Ce projet innovant a été conçu pour maximiser le flux de photons ( $10^{13}$  photons/s comme performance ultime) et offrir une machine de rayons X quasi monochromatique compacte, fiable et de fréquence réglable. La plateforme **PRAE** fournira un faisceau d'électrons de haute énergie (70, puis 140 MeV), pour mener des activités de recherche aux interfaces de la physique, de la biologie et de la médecine, actuellement présentes dans quatre laboratoires de la vallée d'Orsay (IMNC, LAL, IPN et LPT). L'installation européenne **ELI-NP** comprend une source laser extrême et la source de gamma très intense GBS, dont la brillance attendue est de deux ordres de grandeur supérieure aux autres sources. Installée en Roumanie, la machine GBS ouvrira de nouvelles possibilités pour la physique nucléaire et d'autres applications. Elle comprend un photo-injecteur, un accélérateur linéaire, un laser et un circulateur optique pour l'augmentation de la fréquence d'interaction à 3.2 kHz. La machine GBS est proposée par un consortium composé de l'INFN, du CNRS et d'entreprises privées.

### **Accélération laser-plasma – LLR/CENBG/LAL**

L'accélération de particules par des ondes plasma, et notamment celles créées par laser est un domaine relativement récent, très en amont de la R&D accélérateur. Il a connu des avancées remarquables lors de la dernière décennie et a engendré une multitude de projets expérimentaux dans le monde, rendus possibles par la démocratisation des lasers infrarouges, de haute puissance ( $>10^{14}$  W) et ultra-courts ( $<10^{-13}$  s). Dans des régimes plasma et par des mécanismes très différents, il est aujourd'hui possible d'accélérer des électrons jusqu'à quelques GeV, des protons et des ions légers jusqu'à quelques centaines de MeV, sur des distances très petites (cm) et dans des paquets très brefs ( $<10^{-14}$  s). À des horizons temporels différents, ces recherches visent des applications multiples (sources de rayons X, accélérateurs et collisionneurs compacts ...). Les laboratoires l'IN2P3 impliqués dans le domaine de l'accélération laser-plasma sont le LLR avec le groupe GALOP (accélération par laser et ondes plasma), le CENBG avec le groupe ENL (excitations nucléaires par laser), et le LAL

avec les groupes ESCULAP (électrons courts pour l'accélération plasma) et ETALON (mesure de paquets courts de particules chargées). Le mode de fonctionnement en régime non linéaire est validé par des codes de simulation, comme SMILEI. Les activités de R&D expérimentale sont centrées sur l'accélération d'électrons dans des plasmas sous-denses auprès de **CILEX**, centre interdisciplinaire de lumière extrême, installé sur le plateau de Saclay avec dans le futur proche l'utilisation du laser petawatt APOLLON. L'importance de cette R&D s'est concrétisée au niveau européen avec le projet EuPRAXIA auquel participent le CEA, le CNRS et SOLEIL. Le projet **ESCULAP**, d'injection d'un faisceau conventionnel produit par PHIL dans un accélérateur plasma produit par Laserix permet d'aborder une thématique complémentaire. Le projet **ETALON** propose une mesure non destructive de la distribution longitudinale de paquets de particules relativistes en un seul tir. La génération d'ions, de protons ou noyaux plus lourds par des cibles solides illuminées par des lasers intenses est également à l'étude : cette technique requiert l'amélioration de la qualité des faisceaux, potentiellement par recours à des jets de gaz comme cible.

### **R&D sources d'ions – GANIL/IPNO/LPSC**

Les activités sur les sources d'ions à l'IN2P3 concernent principalement les sources d'ions lourds à la résonance cyclotronique électronique (ECR), les ensembles cible-source (ECS), les amplificateurs d'états de charge (ou boosters de charge). Toutes sont importantes dans le contexte de SPIRAL2 dans ses phases 1,1+, 1++ ou 2. **Les sources ECR d'ions lourds stables** sont utilisées pour produire les faisceaux d'ions multichargés des accélérateurs : pour le projet SPIRAL2, la source en développement (Phoenix-V3) doit délivrer des faisceaux intenses  $Q/A = 1/3$  jusqu'à l'argon ( $^{40}\text{A}$ ). Des développements sont en cours sur cette source pour la production d'ions métalliques. En vue d'une extension substantielle du domaine d'opération de SPIRAL2, une source de rapport  $Q/A = 1/7$  est en discussion. Parallèlement, une R&D amont est menée sur une source à 60 GHz très ambitieuse, aux performances inégalées (densité de  $4.10^{13} \text{ m}^{-3}$ ). **Les ensembles cible-source** produisent des faisceaux d'ions radioactifs d'état de charge 1+. Dans la perspective de la jouvence de SPIRAL1 et du projet SPIRAL2, un programme de R&D de sources d'ions +1, couplées à des cibles à haute température, a été initié. Des sources sont actuellement en cours d'implémentation sur SPIRAL1 et ALTO (sources à plasma, source à ionisation de surface). Parallèlement, le développement d'une source laser sélective est mené à ALTO et au GANIL avec le projet REGLIS dans le but d'ioniser les isotopes radioactifs produits à S3, et à plus long terme les transporter vers DESIR. D'autres études concernent de nouveaux matériaux cibles innovants pour la production d'éléments réfractaires. Pour la jouvence de SPIRAL1, l'objectif est de produire 3 ECS/an pour l'exploitation, ainsi que 1 ECS/an pour le développement. **Les boosters de charges** sont utilisés pour augmenter l'état de charge des faisceaux radioactifs afin d'assurer leur post-accélération. Deux approches complémentaires existent : l'une fondée sur une source ECR, comme pour le projet SPES (INFN-LNL Italie), et l'autre sur une source EBIS (electron beam ion source). Ces boosters de charge optimisés devraient permettre une caractérisation complète de la production de faisceaux radioactifs multichargés. Des R&D sont également menées pour optimiser leur fonctionnement.

### **R&D supraconductivité en régime radiofréquence (SRF) – IPNO/LAL/LPSC**

Une cavité radiofréquence (RF) est une enceinte métallique soumise à un champ électromagnétique pour accélérer des particules chargées. Le recours à un matériau de construction, exploité dans un état supraconducteur, permet d'éliminer les pertes d'énergie venant de la résistance électrique du matériau.

Les activités de R&D de supraconductivité en régime RF à l'IN2P3 visent l'acquisition des compétences nécessaires à la construction et au fonctionnement d'un accélérateur supraconducteur. Cette R&D reste d'actualité, car elle permet des accélérations de faisceaux qui sont impossibles avec une technologie chaude, à savoir une accélération continue de plusieurs mA sous un champ électrique de plusieurs MV/m. L'IN2P3 est spécialisé et reconnu pour ses compétences sur les accélérateurs en niobium, dits à faible  $\beta$  ( $=v/c$ ) c'est-à-dire des accélérateurs d'ions ou de protons à des énergies modérées, comme SPIRAL2, ESS ou MYRRHA. Le programme de R&D est foisonnant, avec six projets distincts dont les ressources humaines sont modérées (1 ETP / projet en moyenne). L'ensemble peut se classer en trois catégories : l'obtention du plus fort gradient accélérateur possible, l'obtention de la plus faible résistance de surface possible (haut facteur de qualité  $Q_0$ ) et enfin la fiabilisation des systèmes en configuration de fonctionnement. Les programmes **CAVSUP** et **MYRRHA** couvrent l'ensemble de ces aspects alors que les programmes **PICASU** et **ECOMI** portent sur les deux premières catégories et les programmes **MULTIPAC** et **COUPLEUR** se concentrent spécifiquement sur la troisième catégorie.

### **Projet MYRRHA - IPNO/LPSC**

Porté par le SCK-CEN (Belgique), MYRRHA est un prototype de réacteur nucléaire piloté par un accélérateur (Accelerator Driven System, ou ADS), système étudié dans certains scénarios de retraitement de déchets nucléaires. L'accélérateur, couplé à un réacteur nucléaire sous-critique via une cible de spallation, délivrera un faisceau intense (4 mA) de protons de haute énergie (600 MeV). La principale contrainte d'un tel accélérateur est sa fiabilité, indispensable pour assurer le couplage avec le réacteur nucléaire (moins de 10 arrêts plus longs que 3 s requis par cycle de 3 mois). Ce projet s'inscrit dans le prolongement de projets européens successifs dans lesquels l'IN2P3 a été l'acteur principal de la définition du design de référence de l'accélérateur. Le projet MYRTE (2015-2019, H2020 Euratom) se focalise sur la construction et le prototypage des premiers éléments de l'injecteur. Depuis 2016, le SCK-CEN finance une phase de prototypage avancé de tous les éléments de l'accélérateur dans l'objectif de lancer la construction de la première partie de l'accélérateur à l'horizon 2020, MYRRHA phase 1, limitée à 100 MeV. La technologie retenue permettra la mise en œuvre d'un schéma de compensation de panne, résultat d'études de R&D menées depuis plus de dix ans au travers de différents projets européens au sein desquels l'IN2P3 a joué un rôle majeur. Le gouvernement belge a annoncé en 2018 le financement de la phase MYRRHA 100 MeV.

## **3.2. Prospectives**

### **R&D photo-injecteurs et sources Compton**

Les sujets de R&D de la plateforme PHIL sont pertinents mais ambitieux, compte tenu des moyens humains disponibles. Malgré son importance pour d'autres projets, la situation de PHIL en ressources humaines est critique. D'autre part, le budget alloué à PHIL est actuellement inférieur au coût de son fonctionnement annuel. Il est donc impératif de définir une stratégie de mise en place des moyens nécessaires à l'exploitation de cette plateforme. De même, il est indispensable de préparer un plan de financement pour assurer les frais de fonctionnement de ThomX pour la période au-delà de celle financée par l'ÉquipEx originel. Cette installation présente un potentiel d'intégration dans des environnements hors laboratoire (hôpitaux, musées), mais la stratégie d'industrialisation n'est pas encore définie. La question des ressources humaines effectivement disponibles pour ThomX, compte tenu des autres projets en cours au LAL est critique. Les sources de lumière se situant, d'un point de vue scientifique, à l'interface des activités de l'institut avec d'autres instituts ou organismes, les contributions de ces différents acteurs doivent être équilibrées. Ces activités ont un potentiel d'industrialisation, mais qui reste encore à explorer. Les travaux menés sur ELI-NP sont

extrêmement innovants, ils génèrent une production scientifique importante et des thèses. Cependant, la question des ressources humaines est ici encore critique. Le personnel impliqué, scientifique et technique, est en partie commun aux autres projets et les calendriers sont très proches.

En résumé, la question des frais de fonctionnement semble délicate ainsi que la disponibilité des ressources humaines pour les projets PHIL, ThomX, PRAE et ELI-NP : une stratégie concrète de gestion des moyens doit être établie de manière globale rapidement surtout concernant l'exploitation pour les 3 projets locaux d'Orsay. Les collaborations doivent être renforcées, au-delà de l'existant, pour permettre notamment d'alléger le déficit en ressources humaines. Enfin, compte tenu des aspects contractuels pour ELI-NP, la question sur le partage des responsabilités au sein du consortium en cas de retard ou de non-conformité par rapport aux spécifications se pose.

### **Accélération laser-plasmas**

Dans le domaine de l'accélération laser-plasma, la pertinence et la variété des activités est à souligner tout autant que la position pionnière de certaines équipes françaises. Cependant, dans un contexte de montage de projets internationaux de grande envergure, la relative dispersion et les tailles modestes des équipes, travaillant parfois sur des sujets très proches, est préoccupante. Une meilleure coordination entre les équipes doit impérativement être mise en place. Une fois celle-ci opérée, les développements techniques associés ainsi que l'accès à des lasers de puissance à haute cadence semblent possibles, au prix d'un léger renforcement de l'activité. La place du LLR dans CILEX est stratégique, mais souffre de l'absorption de l'unique chercheur dans des tâches de coordination. Les paramètres du photo-injecteur PHIL du LAL, bien qu'impressionnants pour d'autres applications, ne sont pas forcément adaptés à l'accélération laser-plasma que le Laserix peut produire. D'autre part, les ressources en personnel semblent insuffisantes pour un effort purement local, hors des grandes collaborations, et la sécurisation des financements nécessaires n'est pas garantie. Les moyens d'un rapprochement de l'équipe ESCULAP avec d'autres, impliquées dans des thématiques voisines, doivent être étudiés ainsi que la recherche de financements communs. Un rapprochement des équipes du LAL et du LLR bénéficierait évidemment aux deux équipes. Avec la fin de son ANR, l'équipe ETALON sera également confrontée à un manque de moyens humains et devra donc établir une stratégie claire basée sur une participation à CILEX. Si l'IN2P3 souhaite apporter une contribution à la hauteur des enjeux pour le but à long terme de futurs collisionneurs, une collaboration renforcée est à engager rapidement entre les équipes du LLR, du CEA et du LAL, en particulier en précisant la contribution de ce dernier au projet CILEX-APOLLON. Enfin, les développements sur l'utilisation de jets gazeux haute densité comme cible pour la production d'ions par illumination avec un laser intense méritent largement d'être soutenus.

### **R&D sources d'ions lourds**

Les activités sur les sources d'ions lourds sont essentielles, en particulier pour l'upgrade de SPIRAL1 et pour SPIRAL2, et doivent être soutenues, mais la coordination des équipes doit être améliorée. L'expertise historique sur les sources ECR pour la production d'ions stables est indéniable et mérite un support constant, incluant les développements à long terme, comme la source à 60 GHz. Les développements pour la phase 1++ de SPIRAL2 (et à terme la phase 2) donneront des opportunités uniques au niveau mondial. La R&D sur les faisceaux métalliques est importante mais bénéficierait grandement de la définition d'une stratégie claire, fondée sur les besoins des utilisateurs, devant déboucher sur un faisceau intense d'uranium. Le développement d'une source innovante à 60 GHz initiée par les beta-beams est

un programme de physique exploratoire au service de la communauté ECR mondiale, qui nécessitera un savoir-faire sur les plasmas spécifiques aux ECR. L'affichage d'une autre motivation physique que les beta-beams, aujourd'hui au point mort, serait bénéfique.

Une meilleure coordination doit être mise en place sur les ensembles cible-source pour la production d'ions radioactifs. La R&D devrait être guidée par les chaînes complètes de production et d'accélération pour des éléments chimiques spécifiques, prenant en compte les pertes inhérentes à chaque composante. Les développements d'une source laser sont essentiels pour S3 et la phase 2 de SPIRAL2. Dans l'hypothèse d'une phase 2, la durée de vie annoncée de trois mois pour les ECS semble optimiste, et doit soit être démontrée ou réduite (et la stratégie redéfinie).

L'IN2P3 bénéficie d'une expertise sur les boosters ECR, en particulier pour la jouvence de SPIRAL1. Le booster ECR installé en Italie sur SPES doit être suivi et caractérisé en détail. Les arguments pour choisir entre les technologies ECR et EBIS doivent être soigneusement examinés car un booster EBIS pourrait être une meilleure alternative pour les expériences phares de SPIRAL2 phase 2.

Les priorités à imposer à l'ensemble de ces projets dépendent crucialement et évidemment du futur de SPIRAL2, que l'IN2P3 devra clarifier et prendre en compte. Une structure de coordination des R&D sur les faisceaux radioactifs doit être mise en place rapidement. Elle doit inclure, ou consulter, les experts des deux laboratoires concernés (GANIL et IPNO), ceux du LPSC pour la composante booster, ainsi que des physiciens utilisateurs. Ces derniers seront essentiels pour mettre en perspective les développements techniques. Cette structure pourra, de plus, être étendue à l'activité, essentiellement indépendante, des faisceaux stables, et rédiger des feuilles de route pour les deux types de faisceaux.

### **R&D supraconductivité en régime radiofréquence (SRF)**

La R&D SRF doit reposer sur un équilibre permanent entre développements indispensables à la réussite de projets en cours de construction et choisis par l'institut, et une recherche en amont pour conserver un leadership dans ces domaines. Il est vital de veiller à cet équilibre. Les projets permettent les investissements d'infrastructure indispensables à la R&D pour les projets d'avenir. La R&D la plus prospective est celle qui concerne l'amélioration du gradient des cavités : elle ne s'inscrit pas directement dans les activités historiques « niobium » de l'IN2P3, mais a un potentiel d'amélioration conséquente du gradient accélérateur et représente donc un enjeu important pour le futur de la thématique. Elle doit être soutenue notamment par l'exploitation d'expertises qui se trouvent à la frontière de plusieurs disciplines. La R&D relative à l'amélioration du gradient (CAVSUP, PICASU, ECOMI) est la plus prospective. La volonté de développer une abrasion mécanique pour remplacer et améliorer le traitement chimique de surface, et ainsi améliorer significativement l'état de surface des cavités, est un progrès significatif qui doit se poursuivre. La recherche sur le multicouche et les matériaux alternatifs est ambitieuse car elle demande la mise en œuvre de techniques de dépôt de couches minces complexes, difficiles à maîtriser. Ce choix peut conduire à une amélioration importante des capacités d'accélération des cavités. Toutefois, la démonstration de sa faisabilité reste à faire, sur une surface plane, et à bien plus long terme, dans un contexte de cavités accélératrices. Cela doit se faire avec des moyens rapidement renforcés probablement issus d'autres laboratoires et instituts pouvant apporter une expertise, l'ensemble devant être coordonné. Les R&D haut Q0 et fiabilisation (CAVSUP, MYRRHA, MULTIPAC, COUPLEUR, PICASU) sont très prometteuses et permettront un excellent retour sur investissement. Il faut encourager les collaborations entre laboratoires travaillant

sur un même sujet. Enfin, la discipline bénéficierait grandement d'une cavité accélératrice multimode dédiée, ce que la faiblesse du budget alloué par l'IN2P3 aux travaux de R&D ne semble pas permettre, tous les investissements d'infrastructure se faisant grâce à des fonds ponctuels obtenus sur appels d'offres.

### **Projet MYRRHA – IPNO/LPSC**

Le projet MYRRHA est important au niveau purement scientifique mais aussi pour remplir les missions sociétales du CNRS. Dans ce cadre, l'institut joue un rôle moteur au sein des projets européens soutenant les développements pour un accélérateur pour un complexe ADS. Cela a permis de former des personnes dans le domaine, mais aussi d'acquérir de nouvelles compétences tout en apportant des résultats et le développement de nouveaux outils/concepts. Dans le projet européen MYRTE, le workpackage accélérateur se focalise sur la construction et le prototypage des premiers éléments de l'injecteur. Il convient de souligner la qualité de ces activités, tout à fait dans le cadre des missions de l'IN2P3, qui doivent être soutenues jusqu'à la réalisation des prototypes. Le lancement de la phase 1 de MYRRHA (100 MeV) est une excellente opportunité pour l'IN2P3 de participer à la construction d'un grand instrument fondé sur des concepts novateurs, tout en apportant et en continuant à développer son expertise dans le domaine des accélérateurs de particules. Les ressources sont en adéquation avec les objectifs des équipes de l'IN2P3 et reflètent une bonne connaissance des enjeux liés aux livrables prévus à ce stade. Le développement d'un cryomodule implique principalement l'IPNO, mais aussi le LPSC et dans une moindre mesure le LAL. Sa réussite passe par une implication coordonnée des trois laboratoires. L'intérêt de la synergie technologique avec ESS est clair et est un point fort du projet. Le coût et les ressources humaines importants nécessitent des discussions détaillées entre l'IN2P3 et le SCK-CEN. Les responsables du projet doivent poursuivre les discussions pour préciser et fixer les engagements respectifs. Il est impératif que l'IN2P3 veille à ce que soit mis en place un groupe local en Belgique, correspondant à l'ambition du projet à la fois pour la construction et pour l'opération. Les activités de R&D liées à la fiabilité sont utiles non seulement pour un projet tel que MYRRHA mais aussi pour les accélérateurs en général et présentent donc de ce fait un intérêt certain pour l'IN2P3. L'implication de l'IN2P3 dans la dynamique de faisceau de MYRRHA a été prépondérante et a ainsi participé à la crédibilité du projet d'ADS dans la communauté. En forte baisse aujourd'hui, cette compétence indispensable de dynamique des faisceaux doit absolument être renforcée à l'IN2P3 pour assurer le succès du projet.

### **Projet SPIRAL2**

SPIRAL2 est une extension du GANIL et de SPIRAL1 proposée dès le début des années 2000 pour accroître significativement la production d'isotopes radioactifs et du flux de neutrons du GANIL. Depuis 2006, le projet se décline en quatre phases : l'accélérateur linéaire et les aires expérimentales **S3** et **NFS** (phase 1), l'aire expérimentale **DESIR** (phase 1+), l'injecteur de haute intensité (phase 1++) et le bâtiment de production d'ions exotiques (phase 2). Les bâtiments de la phase 1 sont construits et l'installation de la machine est bien avancée, mais l'obtention des autorisations retarde le démarrage de l'accélérateur linéaire. Les faisceaux de SPIRAL2 seront de haute intensité (jusqu'à 5 mA) et d'énergie 14,5 MeV/A (ions lourds), 20 MeV/A (deutons) ou 33 MeV (protons). Ces faisceaux seront dans un premier temps injectés dans NFS (Neutrons for Science) afin de produire de très hauts flux de neutrons pour la physique nucléaire fondamentale, l'astrophysique, la physique des matériaux et le cycle électronucléaire. Le deuxième équipement est le séparateur-spectromètre supraconducteur S3 de très grande acceptance et résolution. S3 examinera des noyaux loin de la stabilité, très lourds et super-lourds et des collisions ions-ions. DESIR est une installation qui utilisera des faisceaux issus de SPIRAL1 et de S3/REGLIS à une énergie de 30-60 keV pour des études en

spectroscopie de décroissance, spectroscopie laser et spectrométrie de masse. Les phases 1 et 1+ sont intégralement financées avec un coût global de 122,8 M€ (coût 2016). Pour augmenter les intensités de l'accélérateur de SPIRAL2, un nouvel injecteur « A/Q=7 » d'ions lourds (masse au-delà de 50) est prévu dans la phase 1++, mais n'est actuellement pas financé. Fin 2013, à cause de contraintes financières, la phase 2 de SPIRAL2 a été reportée sine die, sans financement prévu à ce jour. SPIRAL2 permettra une avancée importante dans notre compréhension dans de nombreux domaines de la physique tels que la structure nucléaire, l'astrophysique nucléaire, la physique atomique, la physique des neutrons et la physique médicale. Cependant, l'arrêt de la phase 2 à un stade d'étude détaillée pénalise fortement la communauté.

### **Travaux sur les futurs collisionneurs – LAL/LAPP/IPHC/IPNO**

Les travaux entrepris dans le cadre des accélérateurs de type collisionneurs incluent le réglage du faisceau dans la zone de collisions pour optimiser la luminosité, la collimation du faisceau dans des éléments sensibles de l'accélérateur tels que les aimants supraconducteurs, les équipements de mesures pour caractériser les faisceaux ou encore l'intégration de l'accélérateur et les expériences. Ces activités sont menées auprès d'accélérateurs déjà en exploitation comme le LHC ou SuperKEKB au Japon, mais aussi pour des projets de futures machines tels que CLIC, ILC ou FCC-hh.

Quatre laboratoires sont impliqués dans ces activités. Dans chaque laboratoire, cinq à dix personnes y participent. Le choix des sujets d'études est conditionné par la taille des équipes. Les travaux se concentrent principalement sur des études à forte valeur ajoutée, scientifique ou technique, et n'essaient pas de rentrer en compétition avec les grands laboratoires d'accélérateurs comme le CERN, KEK ou DESY.

### **3.3. Conclusions**

Les activités « R&D accélérateurs » à l'IN2P3 couvrent un large spectre, allant des concepts innovants les plus fondamentaux à la construction d'accélérateurs proprement dits. Cette variété témoigne d'une excellente expertise à l'institut et elle profite à de grands projets nationaux (SPIRAL2, ALTO...) et internationaux (ESS, MYRRHA, ELI-NP...). Cette expertise a amené les chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'IN2P3 à s'investir dans un grand nombre de projets, de tailles diverses. Cependant, beaucoup de ces projets sont sous-dotés en ressources humaines (parfois moins de 1 ETP). Une réflexion est donc nécessaire afin de concentrer certaines de ces activités, à l'intérieur des laboratoires ou à un niveau national.

Par ailleurs, il convient de souligner l'importance de conserver un bon équilibre entre la recherche la plus en amont, véritable enjeu pour le futur, et les aspects de construction et d'amélioration des machines actuelles.

La possibilité de financement d'un certain nombre de ces projets par des programmes de relativement courte durée (ANR, EquipEx, IdEx, LabEx et autres Ex) est une opportunité pour leur démarrage, mais présente un danger pour leur pérennité. La question de l'avenir à long terme de certains de ces projets se pose clairement. Il est évident que l'institut ne peut pas, à lui seul, tous les soutenir au-delà de la fin de leurs financements initiaux. Comme dans d'autres domaines, une stratégie doit absolument être développée avec tous les financeurs, en amont et à long terme. Elle passera nécessairement par une priorisation des activités de l'institut.

L'accélération de particules par ondes plasma créées par laser est un sujet fédérateur au-delà du périmètre de l'IN2P3. Il a un potentiel à très long terme pour des accélérateurs de particules ou la production de radio-isotopes. L'étude de ce potentiel doit être accompagnée par l'institut.

Les activités en lien avec SPIRAL2, projet phare de la physique nucléaire européenne aux financements et aux contributions in-kind internationaux, doivent être fortement soutenues, autant au niveau de l'accélérateur que des sources de production des faisceaux stables et radioactifs. Ces derniers méritent une meilleure structure de coordination.

Le travail sur les collisionneurs du futur et le développement des structures supraconductrices en régime RF sont un investissement dans le cœur de métier de l'IN2P3 pour la physique des particules et la physique nucléaire. Il doit être soutenu à un niveau adéquat.

Les activités dans le cadre de MYRRHA se situent dans le contexte de la mission sociétale du CNRS et de l'IN2P3. Elles doivent profiter d'un soutien continu de la part de l'institut. En forte baisse aujourd'hui, la compétence indispensable dans la dynamique de faisceau doit absolument être renforcée à l'IN2P3 au moins pour le projet MYRRHA et peut-être de façon plus générale.

## **4. Radiochimie**

### **4.1. Contexte**

Le domaine de la Radiochimie est, par essence, interdisciplinaire puisqu'il couvre des sujets aux enjeux sociétaux majeurs tels que la préservation et la durabilité des ressources, la réduction du risque anthropique, la médecine nucléaire et la toxicité nucléaire, notamment. Ainsi, les activités de Radiochimie se déclinent à l'interface de plusieurs thèmes académiques (physique, chimie, biologie, médecine,...) et en fort partenariat avec l'industrie et les organismes de recherche (CEA et autres EPICS). De fait, le défi permanent à relever par les chercheur(se)s en Radiochimie de l'IN2P3 est le maintien de l'équilibre entre recherche fondamentale à buts applicatifs et recherche purement appliquée (donc de visée à plus court terme).

Actuellement, les activités de la Radiochimie sont essentiellement structurées autour de la problématique de l'Énergie nucléaire et de ses applications sociétales (Environnement, Médecine/Santé,...) et couvrent un très large domaine de recherches qui s'étend de l'amont à l'aval du cycle électronucléaire. Afin de disposer d'une vue globale des activités menées en Radiochimie, ces recherches peuvent être déclinées en six grandes thématiques :

- Matériaux irradiés et Radiolyse : Effet de l'irradiation et diffusion
- Stockage de déchets nucléaires : Transfert des radionucléides
- Chimie des radionucléides (et métaux lourds) dans l'environnement
- Production, extraction et interaction dans le milieu biologique des radionucléides
- Chimie et traitements des sels fondus pour le combustible et son retraitement
- Chimie des actinides pour la fabrication de couches minces

Les équipes IN2P3 contribuant aux activités de Radiochimie sont réparties dans six laboratoires : l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC, Strasbourg), l'Institut de

physique nucléaire de Lyon (IPNL), le Centre d'études nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG), l'Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPNO), le Centre des Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM, Orsay) et le laboratoire de Physique subatomique et des technologies associées (Subatech, Nantes).

### **Matériaux irradiés et Radiolyse : CENBG, IPNO, IPNL, IPHC, Subatech**

Le principal objectif de ces recherches est l'évaluation du comportement à long terme de solides, de solutions ou d'interfaces solides/solution irradiés, principalement liés aux cycles électronucléaires. Les études portent sur trois aspects principaux qui sont la stabilité structurale et chimique des matériaux sous irradiation, leur capacité de rétention et de confinement des radioéléments piégés et les comportements à l'interface solide-liquide.

Le domaine définissant les effets de l'irradiation dans les matériaux du nucléaire a pris son essor avec l'avènement des premiers réacteurs nucléaires pour la production d'énergie dans les années 50. De nombreux travaux de recherche ont été alors consacrés, à la fois d'un point de vue expérimental et théorique, aux effets de l'interaction des particules avec la matière et à leurs effets. L'utilisation de petits accélérateurs et d'implanteurs d'ions, présents notamment au sein des laboratoires de l'IN2P3 (Lyon, Orsay, Strasbourg), a permis rapidement l'investigation des dommages induits par les collisions balistiques, associé à la formation de cascades de déplacements. L'ouverture du GANIL au début des années 80 et le choix délibéré de réserver une fraction significative du temps de faisceau à des activités dites 'péri-nucléaires' ont donné une impulsion majeure à ce domaine, permettant une exploration systématique des effets de l'excitation électronique dans les solides.

Les recherches actuelles couvrent un domaine étendu qui peut être scindé en deux volets principaux :

- L'irradiation des matériaux du nucléaire : matériaux métalliques, matériaux ioniques (oxydes), matériaux covalents (graphite, carbures de Si et U).
- La radiolyse en solution et aux interfaces et la dosimétrie associée

Elles sont menées en collaboration avec des équipes de recherche CNRS (INC, INP) et du CEA/DEN qui possèdent des plateformes instrumentales complémentaires de celles de l'IN2P3. Elles bénéficient de plus d'un fort partenariat avec les industriels (EDF, ORANO,...) et les EPICs (CEA, Andra).

En terme de positionnement, même si de nombreux matériaux étudiés relèvent des cycles de combustibles actuels ou futurs, les actions menées et les méthodologies déployées rayonnent bien au-delà de la seule communauté des radiochimistes ou des physiciens/physico-chimistes de l'irradiation.

### **Stockage de déchets nucléaires : Transfert des radionucléides (IPNL, IPNO, Subatech)**

Le contexte de ces recherches s'inscrit dans le cadre législatif de la loi Bataille (91-1381 du 30/12/1991 et 2006-739 du 28 juin 2006) relatives à la gestion des matières et déchets radioactifs. Il s'agit de définir les conditions de réalisation de stockages géologiques de déchets radioactifs de diverses durées de vie et activités mais également de comprendre et maîtriser leurs impacts sur l'environnement pendant de très longues périodes. Le type de stockage et les mécanismes physico-chimiques mis en jeu dépendent du type de déchets concernés.

La complexité des recherches, menées par les équipes de l'IN2P3 impliquées dans cette thématique tient, entre autres, au couplage entre les différents mécanismes physico-chimiques qui interviennent successivement entre les radionucléides et les différentes barrières de confinement sur une échelle de temps de plusieurs centaines de milliers d'années. Les études reposent sur une approche globale et multi-échelles de ces différents effets. Le but principal de ces recherches est de minimiser les incertitudes sur l'effet des différents processus mis en jeux. Cette problématique s'applique essentiellement aux déchets de moyennes et hautes activités à vie longue, certainement les plus impactant.

Les recherches réalisées dans la thématique de stockage des déchets répondent à des enjeux nationaux et internationaux. Elles s'intègrent parfaitement aux objectifs et orientations de l'Institut et mobilisent les moyens humains de trois laboratoires IN2P3, de façon variable.

Ces recherches sont structurées en projets le plus souvent adossés à des partenaires industriels. De plus, les soutiens du grand défi interdisciplinaire du CNRS NEEDS, de nombreux projets européens et du financement des EPICs (Andra, CEA, ...) ont contribué de manière substantielle au développement de ce domaine dans ces dernières années.

En terme de positionnement, les activités liées au stockage sont en pointe au niveau international avec une expertise reconnue et des réalisations techniques de premier plan, dont certaines sont uniques. Néanmoins, du fait même de sa nature, cette thématique de recherche reste exposée aux évolutions, à court ou à moyen terme, des politiques des partenaires et à la diminution de certaines voies de financements.

### **Chimie des radionucléides (et métaux lourds) dans l'environnement (CENBG, IPHC, IPNO, Subatech)**

Cette thématique a pour but de comprendre le comportement des radionucléides (RN), actinides (An) et autres radioéléments d'origine naturelle et/ou artificielle, ainsi que des métaux lourds (ML, essentiellement lanthanides et plomb comme éléments de contextualisation) dans l'environnement.

L'enjeu sociétal majeur qui sous-tend ces recherches est celui du devenir et de l'impact de ces éléments (introduits par les activités anthropiques) sur les écosystèmes. Le questionnement scientifique associé, qui se pose au niveau international, porte sur l'évaluation de l'écotoxicité de ces éléments et nécessite donc l'acquisition de connaissances fines d'une part sur leur toxicité (nucléaire et/ou chimique), et d'autre part sur les mécanismes de transfert de la géosphère (eau, sols,..) à la biosphère (plantes et *in fine* chaîne trophique).

Cette thématique couvre une part très large des compétences en radiochimie de l'IN2P3. Il est structuré en deux volets. Le premier volet traite de l'impact des RN/ML et vise d'une part, à proposer des procédés de dépollution/décontamination innovants tels que phyto-remédiation bio-augmentée et d'autre part, à établir une relation de cause à effet entre la spéciation chimique des An/RN/ML, leur mobilité (transfert) et leur écotoxicité. De fait, trois axes de recherche sont investigués en parallèle :

- Spéciation chimique (IPHC, IPNO, Subatech) : Élucider la spéciation chimique des An/RN/ML pour différents systèmes. La méthodologie généralement appliquée couple expériences de radiochimie, techniques spectroscopiques de pointe et calculs de chimie théorique afin de déterminer les constantes thermodynamiques et caractériser les espèces.

Certains sujets nécessitent par ailleurs une collaboration forte avec des grands instruments tels que synchrotrons (SOLEIL, ESRF) et cyclotron (ARRONAX).

- Transfert et biodisponibilité (IPHC, Subatech) : Quantifier les transferts (eau/sol vers biosphère) des An/RN à l'échelle des ultra-traces dans les environnements complexes et d'identifier les espèces biodisponibles.
- Effet éco-toxicologiques (CENBG, IPHC) : Appréhender les effets éco-toxicologiques de l'impact des An/ML en se focalisant sur la biodiversité bactérienne.

L'évaluation des impacts des An/RN/ML sur les écosystèmes a conduit naturellement à la mise en place d'une démarche intégrée à caractère fortement pluridisciplinaire rassemblant les compétences complémentaires de radiochimistes, géochimistes, physiciens, biologistes et écologues. Avec la création de la zone atelier « territoire uranifère » (ZATU), labellisée en 2015 par l'INEE, la communauté des radiochimistes de l'IN2P3 (CENBG, IPHC, IPNO, LPC, Subatech + réseau Becquerel) s'est dotée d'un outil de structuration académique fort et visible autour de cette thématique (collaboration avec le BRGM). Cette structure n'a pas d'équivalent en France, ni en Europe.

Le second volet (porté par le CENBG) traite de l'analyse en ultra-traces par spectrométrie de masse de deux radioisotopes du krypton ( $^{81}\text{Kr}$  et  $^{85}\text{Kr}$ ) particulièrement bien adaptés à la datation des eaux souterraines et des glaces polaires ou au traçage des activités nucléaires civiles ou militaires. Cette technique chronométrique ultra-sensible peut se pratiquer sur quelques milliers d'atomes de  $^{81}\text{Kr}$  et  $^{85}\text{Kr}$  seulement, permettant d'utiliser des volumes très restreints d'échantillons.

En terme de positionnement, la thématique, dans son ensemble, s'intègre parfaitement dans les priorités et orientations de l'IN2P3. De plus, sur la base des publications, conférences nationales et internationales présentées, les travaux scientifiques réalisés sont tout à fait pertinents et de très bonne qualité. Néanmoins, les moyens financiers disponibles dépendent encore trop directement des seuls appels à projets ce qui peut, à terme, fragiliser la dynamique engagée par les équipes.

En radiochimie environnementale, la recherche est, par essence, transdisciplinaire. Naturellement, des collaborations fortes se sont créées en interne à l'IN2P3 (réseau Becquerel) mais aussi avec d'autres instituts du CNRS (INC, INEE, INSU). La légitimité des équipes de l'IN2P3, et par extension celle de toute la communauté académique, dans ce domaine, se fonde sur une perspective de recherche fondamentale pluridisciplinaire et un positionnement indépendant et néanmoins complémentaire des acteurs historiques du nucléaire (IRSN, ORANO, CEA entre autres).

### **Production, extraction et interaction dans le milieu biologique des radionucléides (CENBG, IPHC, IPNO, Subatech)**

Le programme de recherche en radiobiologie est associé à la radioactivité et à la santé, plus précisément aux thématiques « toxicité nucléaire » et « utilisation des radionucléides en médecine nucléaire ». Les questions posées, à l'interface entre chimie et santé, sont fondamentales pour la gestion sociale d'un nucléaire durable d'une part et pour le développement de systèmes innovants en thérapie et plus généralement en clinique.

La thématique « toxicologie nucléaire » consiste en l'évaluation de l'impact des éléments radioactifs, à diverses concentrations, sur la santé humaine. Cette activité est organisée autour de projets pluridisciplinaires impliquant physiciens, (radio)chimistes, biologistes,

(radio)pharmaciens et médecins. Elle s'intéresse, par exemple à la toxicité de l'uranium (CENBG) ou à la description des interactions actinides/molécules biologiques (IPNO). Sa structuration au niveau national est réalisée dans le cadre du programme Toxicologie nucléaire porté par le CEA.

L'utilisation des radionucléides dans le domaine de la santé a révolutionné les méthodes de diagnostic médical. La Radiochimie est la clef de voûte de ce domaine avec à la fois la production des RN et leur vectorisation (complexation) afin de cibler les organes et/ou tumeurs pour l'imagerie et la radiothérapie. La thématique « Médecine nucléaire » porte ainsi sur le développement de radiopharmaceutiques innovants, notamment en neurologie et oncologie (IPHC, Subatech).

Ces activités sont structurées dans le cadre du GRD MI2B (Modélisation et Instrumentation pour l'Imagerie Biomédicale) qui regroupe une dizaine de laboratoires de l'IN2P3 (dont IPHC, IPNO et Subatech) et est organisé en quatre pôles (Imagerie, Radiobiologie, Thérapie, Radionucléides).

Bien que les enjeux de ces deux thématiques (toxicologie nucléaire et médecine nucléaire) soient radicalement différents, ils font appel à des connaissances, des savoirs faire et des outils que la communauté des radiochimistes de l'IN2P3 maîtrise totalement. Certains sujets sont la spécialité d'équipes pleinement reconnues dans ce domaine et à la source de leur rayonnement (la chimie de l'At pour SUBATECH, l'imagerie PIXE pour le CENBG par exemple). Les enjeux sociétaux qui y sont associés sont fondamentaux : radiothérapie et imagerie, deux outils fondamentaux de la médecine moderne ou encore stratégie de décontamination, en cas d'accident nucléaire majeur.

Il faut noter que ces thématiques mettent en œuvre des infrastructures mi-lourdes telles que cyclotrons (Nantes, Strasbourg) ou plateforme d'irradiation (Bordeaux).

Ces thématiques sont structurées avec des financements associés à un ensemble de projet très variables au cours du temps et qui restent majoritairement extérieurs à l'IN2P3. On peut souligner notamment le rôle du CEA via le programme transversal TOXNUC (pour la thématique « Toxicité nucléaire »), et le rôle structurant du cyclotron Arronax ainsi que l'importance des financements ANR tel que le LabEx IRON (innovative radiopharmaceuticals in oncology and neurology) qui couvre la période 2012-2019 (thématique « Médecine nucléaire »).

En terme de positionnement, les équipes impliquées dans les deux thématiques ont une bonne visibilité avec une production scientifique dynamique et régulière.

### **Chimie et traitements des sels fondus pour le combustible et son retraitement (IPHC, IPNL, IPNO)**

Cette thématique peut être scindée en deux domaines de recherche, d'une part, l'utilisation de liquides ioniques à température ambiante (RTIL) pour le traitement du combustible nucléaire en utilisant la séparation par extraction liquide-liquide ou la séparation par électro-dépôt dans le cas de l'uranium et des lanthanides (IPHC, IPNL, IPNO), et d'autre part, l'utilisation de sels fondus en tant que combustibles ainsi que le traitement de ces sels combustibles (IPNO). Il est à noter que ces derniers travaux ouvrent le champ à d'éventuels développements à vocation appliquée.

La vocation de l'IN2P3 et les ressources humaines mises en jeu doivent être gardées en mémoire. En effet, il n'est pas question de concurrencer les organismes dont le cœur de métier est la conception de réacteurs industriels. En revanche, le champ de connaissance et le savoir-faire permettent aux laboratoires impliqués de délivrer des informations de première importance pour alimenter la compréhension fine des processus fondamentaux mis en jeu dans une problématique complexe. En ce sens ils sont particulièrement complémentaires et le partenariat avec les industriels fonctionne donc bien.

Ces études se placent dans un contexte international où un développement de réacteurs à sels fondus de type MSFR reprend de l'intérêt, à l'instar de la République Populaire de Chine, ces études sont justifiées. Elles s'intègrent dans les activités statutaires de l'IN2P3 et renforce une visibilité au niveau européen.

### **Chimie des actinides pour la fabrication de couches minces**

Les actinides sont des métaux lourds radioactifs, des éléments chimiques dont le numéro atomique est compris entre 89 et 103. L'actinium, élément de numéro atomique 89 qui débute cette succession de 15 éléments chimiques leur donne son nom.

La chimie des actinides, notamment l'étude de leurs propriétés, est un sujet de recherche en soi. L'étude de cette chimie nécessite la préparation de solutions mères dont le milieu et le degré d'oxydation sont connus. Ce savoir-faire est le point commun qui réunit la chimie des actinides et ses acteurs à la fabrication de cibles d'actinides par électro-dépôt sur supports minces. La finalité de ces cibles est bien différente, il s'agit de fournir des cibles aux caractéristiques les plus précises possibles aux physiciens pour la détermination de données nucléaires utilisées en physique des noyaux supers lourds ou des réacteurs telles que des sections efficaces ou des distributions angulaires de fission. Le groupe radiochimie de l'IPNO possède le savoir et le savoir-faire sur les actinides lui permettant la réalisation de ces cibles. Toutefois, les mêmes personnes sont confrontées à deux impératifs différents, à savoir les études de chimie pour la compréhension des actinides et celles pour la production de cibles. Pour mener à bien les deux activités, une taille critique s'impose dès lors qu'elles doivent être menées par la même équipe. Le projet scientifique du groupe radiochimie de l'IPNO étant complémentaire aux études R&D nécessaires à la production de cibles minces (à une échelle différente de la production épisodique de cibles), cette taille critique est évaluée à trois chercheurs, un ingénieur et un technicien à plein temps.

Le projet CACAO (chimie des actinides et cibles radioactives à Orsay) a vu le jour en juillet 2013, a coûté de l'ordre de 500 k€ d'équipement et d'installation, a fourni 62 cibles et s'est arrêté en 2016 suite au départ de trois de ses quatre membres. Différents problèmes sont à l'origine de leur départ et le groupe Radiochimie de l'IPNO n'a jamais été associé de manière forte à ce projet. L'équipe de recherche sur la chimie des actinides en solution est passée de trois chercheurs et un ingénieur d'étude dans les années 90 à un chercheur (à la date du CSI). Suite à l'arrêt définitif du projet CACAO (en cours de démantèlement), la continuation de l'activité « cible » à l'IPNO dépendra du recrutement successif d'un IR (fabrication des cibles) et d'un CR Radiochimie (purifications radiochimiques). A ce jour, le poste IR (Noemi 2017) n'a pas été pourvu (absence de candidat). Ceci obère donc le redémarrage de l'activité « cibles ». Les engagements pris, après l'arrêt de CACAO (fabrication d'une cible) seront assurés par deux

## 4.2. Prospectives

Comme il a été montré précédemment, les domaines couverts par les activités de Radiochimie sont multiples et étendus. De fait, leur avenir à court et moyen terme dépendra de la capacité de la communauté de Radiochimie à s'organiser et à se structurer pour assurer la pérennisation des thématiques en particulier vis à vis des moyens humains et financiers.

Ainsi, dès avril 2016, les responsables d'équipes Radiochimie ont remonté à la direction de l'Institut, une demande de création d'un GDR dédié. Finalement, les discussions menées au cours du CSI ont conduit à proposer la création d'un GDR commun IN2P3 et INC couvrant les activités de Radiochimie et de Physique nucléaire portant sur l'Énergie nucléaire et l'Environnement. Le GDR SciNEE pour « Science Nucléaires pour l'Énergie et l'Environnement » a ainsi tenu sa réunion de lancement en février 2018. Compte tenu de l'étendue de son périmètre, le GDR SciNEE est organisé en quatre pôles dont trois couvrent les activités de Radiochimie :

- Pôle 1 : Systèmes nucléaires et scénarios associés
- Pôle 2 : Cycle du combustible
- Pôle 3 : Matériaux du nucléaire sous stress
- Pôle 4 : Radiochimie environnementale, radioécologie

Le rôle de ce GDR est de permettre une animation scientifique favorisant les échanges à l'intérieur des thématiques des pôles mais aussi entre les pôles eux-mêmes et entre chercheurs des différentes spécialités. À ce titre, en 2018, chaque pôle a organisé des journées ateliers spécifiques, afin de renforcer la dynamique d'échange nécessaire (voire indispensable) à l'émergence de projets nouveaux et interdisciplinaires et aussi à favoriser une meilleure organisation pour répondre aux divers appels à projets nationaux (NEEDS, ANR,...) ou internationaux (Europe).

En terme de structuration nationale, il faut noter la création en 2017, de la subdivision « Chimie sous rayonnement et Radiochimie » de la division de Chimie physique (SFP-SCF). Les deux communautés concernées ont décidé de fusionner leurs journées nationales respectives, Journées d'Étude de Chimie sous Rayonnement (JECR) et Journées Nationales de Radiochimie. Les premières réunions communes ont eu lieu en Mai 2018 à Strasbourg (périodicité tous les 2 ans).

Pour les thématiques en lien avec le cycle du combustible et le stockage des déchets, la recherche dans ces domaines est fortement structurée au niveau européen, depuis 2017, par le lancement des appels à projets de JOPRAD (Joint Programme on Radioactive Waste management and Disposal) dans le cadre de l'European Joint Programme (EJP). Dans ce contexte, le CNRS et le CEA ont été mandatés pour représenter la communauté académique française (Research Entities), les autres acteurs nationaux étant l'IRSN (Technical Support Organisation) et l'Andra (Waste Management Organisation). La phase initiale du programme (EJP1) est prévue pour durer cinq ans (2019-2024). Une seconde phase (EJP2) pourrait être décidée vers 2024 en fonction des résultats de EJP1. De nombreux laboratoires du CNRS (IN2P3, INC et INP) ont répondu à ces AAP. Le document final issu du Core Group (RE, TSO, WMO) a été remis à la Commission Européenne en septembre 2018 pour évaluation finale et démarrage du projet mi 2019.

Pour la thématique, « Matériaux irradiés » le futur est porté par les projets liés au CEA et aux industriels (EDF, ORANO,..) qui sont, compte tenu de leurs besoins, des partenaires naturellement très forts.

En ce qui concerne la thématique « Radiolyse », l'avenir à moyen terme est porté par des actions au niveau européen (EJP WP CORI) et par des travaux orientés vers le domaine fondamental (Effet de la radiolyse sur la chimie en solution des actinides par ex.). A plus long terme, la thématique « Radiolyse » pourrait développer des liens forts avec les thématiques « Médecine/Santé » en s'attachant à étudier les effets de la radiolyse sur les cellules (radiobiologie). Cet axe de recherche pourrait conduire, à terme, à un rapprochement (en terme de collaboration) avec la communauté des physiciens nucléaires qui travaille dans ce domaine.

En Radiochimie environnementale, le renouvellement, en 2019, de la labellisation de la Zone Atelier « Territoire uranifère » constituera une étape extrêmement importante. En effet, la ZATU est un outil très fortement structurant pour la communauté académique et qui, par ses actions depuis 2015, a conduit à un rapprochement certain avec les équipes du CEA d'une part, mais surtout avec celles de l'IRSN. Ce point est important car il traduit une avancée en terme de reconnaissance et de visibilité nationale de la communauté académique vis-à-vis d'acteurs nationaux incontournables.

Enfin, depuis la tenue du CSI, le CNRS a intégré (via l'IN2P3) l'European Research Platform ALLIANCE dont le but est de définir des programmes intégrés dans le domaine de la radioécologie afin de répondre au AAP du programme H2020 CONCERT-EJP for the Integration of Radiation Protection. La présence du CNRS à ce niveau, est extrêmement positive en terme de visibilité (nationale et européenne) et devrait permettre, à terme, l'accès à des financements adaptés aux ambitions affichées dans le domaine.

Pour les thématiques en lien avec la médecine et la santé, l'avenir à court terme va très fortement dépendre d'une part, de la suite que le CEA va donner à son programme ToxNuc (thématique « Toxicologie nucléaire ») et, d'autre part, à l'acceptation du Labex IRON II à partir de 2020 (thématique « Médecine Nucléaire »). Pour ce dernier, la décision sera prise début 2019.

Pour la thématique « Chimie des actinides en solution pour la fabrication de couches minces », suite à l'arrêt définitif du projet CACAO (en cours de démantèlement), la continuation de l'activité « cible » à l'IPNO dépendra du recrutement successif d'un IR (fabrication des cibles) et d'un CR Radiochimie (purifications radiochimiques). A ce jour, le poste IR (Noemi 2017) n'a pas été pourvu (absence de candidat). Ceci obère donc le redémarrage de l'activité « cibles » à l'IPNO. Les engagements pris, après l'arrêt de CACAO (fabrication d'une cible) seront néanmoins assurés par deux chercheuses du groupe.

Néanmoins, l'embauche d'une jeune CR a pu être réalisée en 2018, ce qui est une conséquence très positive des discussions menées lors du CSI. Cette jeune chercheuse mènera des recherches sur la thématique « Chimie en trace des actinides en solution ».

En conclusion, la communauté Radiochimie de l'IN2P3 est très dynamique. Les actions menées depuis le CS d'octobre 2016 ont conduit à une réelle structuration des activités de Radiochimie liées à l'énergie nucléaire et à l'Environnement (GDR SciNEE) apportant ainsi une visibilité nouvelle et des interactions renforcées d'une part, en interne au CNRS (avec

INC, INEE, INSU, INP) et, d'autre part, avec les autres acteurs nationaux (CEA, IRSN). Cette structuration rejoint celle déjà bien visible des activités en lien avec la médecine et la santé (GDR MI2B). Ces aspects très positifs ne doivent, cependant, pas masquer le fait que, pour toutes les thématiques abordées ici, la taille des équipes de Radiochimie est généralement petite (à l'exception notable de celle de Subatech) et les moyens humains associés aux différents projets souvent modestes.

Néanmoins, l'ensemble de la communauté « Radiochimie » mobilise une énergie considérable pour s'assurer d'un niveau de financement à la hauteur de ses ambitions, permettant ainsi de pérenniser le fragile équilibre entre recherche fondamentale et recherche à buts applicatifs.

## **5. Rayonnements cosmiques**

### **5.1. Contexte théorique et expérimental**

Le domaine des astroparticules est présent à l'IN2P3 depuis un quart de siècle environ, qui investit des ressources conséquentes dans les expériences Auger/AugerPrime (rayons cosmiques d'ultra haute énergies), H.E.S.S./CTA (Astronomie Gamma de Très Haute Energie), ANTARES/KM3NeT (Astronomie Neutrino) et Virgo/Advanced Virgo (Ondes Gravitationnelles).

Dans les années 90, les projets – pour l'essentiel exploratoires, s'organisaient autour de petites équipes de quelques dizaines de personnes typiquement. Le début des années 2000 a vu s'opérer une transition importante dans ce domaine, avec l'émergence de collaborations internationales comptant parfois plus de 1000 physicien(ne)s, une taille comparable à celle d'ALICE au CERN par exemple.

Après une période de relative indépendance de ces différents domaines, les astroparticules se positionnent de plus en plus dans une approche intégrée multi-longueurs d'ondes et multi-messagers. Ces regards croisés sont la clé de compréhension de nombreux phénomènes. Ils se basent sur une organisation adaptée avec de nombreuses expériences, des accords de coopération entre elles, des réseaux d'alertes et des observations simultanées.

Les projets associés à chaque “messenger” s'améliorent et se développent au fur et à mesure des générations. Cette capitalisation sur les expériences précédentes permet de limiter les coûts tout en obtenant des gains significatifs en sensibilité. D'autres projets basés sur des instruments totalement nouveaux apportent également de nouveaux défis et permettent d'explorer de nouvelles gammes d'énergie et/ou de nouveaux messagers.

### **5.2. Questions Scientifiques**

Les questions scientifiques adressées par les expériences d'astroparticules sont nombreuses et recouvrent différents grands domaines :

- L'univers extrême : que peut-on apprendre des événements cataclysmiques en combinant tous les messagers – photons gamma de haute énergie, neutrinos, rayons cosmiques et ondes gravitationnelles – dont nous disposons ?
- L'univers sombre : quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire ?
- Les neutrinos : quelles sont les propriétés enchevêtrées des neutrinos et que peuvent-elles nous apprendre ?

- L'univers primordial : que peut-on encore apprendre de ce qui s'est passé autour du Big-Bang, avec le rayonnement fossile par exemple ?

### 5.3. Feuille de route européenne

Depuis une dizaine d'années, l'Europe s'organise dans le cadre de l'APPEC (Astroparticle Physics European Consortium). La détection des ondes gravitationnelles et des neutrinos d'origine cosmique montre que la voie ouverte par la première feuille de route de l'APPEC en 2008 était effectivement particulièrement prometteuse. Aujourd'hui le domaine des astroparticules n'a plus à justifier son existence. La croissance de ce domaine implique une organisation scientifique et institutionnelle ainsi que des infrastructures européennes ou mondiales à la hauteur de ses ambitions.

La nouvelle feuille de route, publiée en février 2018 regroupe 9 thèmes de recherche pour lesquels elle a identifié des infrastructures de recherche fortement prioritaires. Elle soutient ainsi notamment les projets CTA, KM3NeT, AugerPrime, LIGO-VIRGO et Einstein Telescope, et estime les dépenses annuelles à environ 100 M€ dans le domaine.

Du fait de la grande taille des collaborations, une attention particulière doit maintenant être portée à la mise en place de modes de fonctionnement économiquement viables et bien organisés. La coordination avec les agences spatiales est importante, en particulier dans le domaine des ondes gravitationnelles, mais également dans celui des sursauts gamma avec le satellite SVOM et les télescopes CTA et KM3NeT. Chaque programme doit être accompagné d'une R&D forte, ainsi que par une véritable politique de gestion et distribution des données, à l'intérieur de la collaboration ou vers toute la communauté. Enfin le potentiel interdisciplinaire doit être exploité, notamment pour accroître des moyens de financement possibles. Géologie, biologie, climatologie sont des synergies possibles.

#### Auger et AugerPrime

L'observatoire Pierre Auger a permis une avancée spectaculaire dans l'étude des rayons cosmiques de ultra-haute énergie (UHERC) avec la mesure de la distribution en énergie de ces particules de  $10^{17.5}$  à  $10^{20}$  eV, la confirmation de la coupure du spectre aux plus hautes énergies – compatible avec celle attendue par interaction entre protons et photons du rayonnement fossile (coupure Greisen, Zatsepin, Kuzmin ou GZK) et l'obtention de fortes contraintes sur le nombre de neutrinos et photons gamma dans ce domaine d'énergies extrêmes. L'un des résultats principaux de la collaboration est d'avoir mis en évidence que la masse des particules primaires semble augmenter à partir d'une certaine énergie, contrairement à ce qui était attendu. Les mesures actuelles ne donnant accès qu'à une valeur moyenne de la composition des primaires, il est crucial de préciser la distribution des masses.

Des questions restent ouvertes et la collaboration Auger se tourne aujourd'hui vers le projet AugerPrime dans le but de comprendre la nature des particules les plus énergétiques. La détermination de la composition de la gerbe atmosphérique sera sensiblement améliorée par l'ajout de 4 plans de scintillateurs de  $4 \text{ m}^2$  sur chaque détecteur Cherenkov à eau constituant le détecteur de surface, couvrant donc  $3000 \text{ km}^2$ , car ces détecteurs ont une réponse aux muons et aux électrons, positrons et photons différentes de celles des détecteurs Cherenkov. On peut noter qu'il est également prévu l'installation d'un réseau serré de scintillateurs enterrés à côté des cuves sur environ  $20 \text{ km}^2$  du réseau ; ces scintillateurs agiront comme des détecteurs de muons car ils seront suffisamment enterrés. Le choix de cette évolution de l'instrument a été décidé par la collaboration comme étant le meilleur compromis entre le coût de l'investissement et les résultats attendus.

Le projet AugerPrime, regroupant des chercheurs de plusieurs continents, est un instrument sans concurrence pour les 5 à 10 années à venir, au moins avec un impact significatif sur le futur de la thématique des rayons cosmiques à très haute énergie. Les équipes françaises, fortes de leur implication dans l'instrument et l'analyse de la génération précédente, ont la volonté et la capacité à poursuivre leurs recherches dans le cadre de ce nouveau projet.

### **ANTARES et KM3NeT**

La collaboration KM3NeT, constituée de près de 200 collaborateurs de 12 pays est en train de mettre en place un réseau de télescopes sous-marins, ORCA et ARCA, sur deux sites en Méditerranée pour la détection et l'étude des neutrinos. Les objectifs scientifiques principaux sont d'une part la recherche de sources de neutrinos cosmiques de très haute énergie (réseau ARCA) et d'autre part la détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos en utilisant les neutrinos atmosphériques (réseau ORCA). La contribution historique d'ANTARES a été à la base de la technologie de détection de KM3NeT. Elle consiste à capter avec des réseaux étendus de photomultiplicateurs la lumière Cherenkov produite dans la mer par le passage des particules chargées issues des interactions des neutrinos dans l'eau.

Les avantages par rapport à l'expérience IceCube, installée en Antarctique et qui observe la lumière Cherenkov dans la glace pour l'étude des neutrinos cosmiques, sont liés à une résolution angulaire meilleure d'un facteur 10, rendue possible du fait que la diffusion de la lumière est plus faible dans l'eau. Cela procure aussi une meilleure résolution en énergie pour les de type « cascade », initiés par un neutrino électronique. En revanche, la longueur d'atténuation est plus faible dans l'eau que dans la glace, permettant à IceCube d'avoir actuellement une plus grande surface effective. IceCube a détecté les premiers neutrinos astrophysiques de haute énergie et a récemment annoncé l'association entre un neutrino de très haute énergie avec une éruption d'un noyau actif de galaxies, observée en rayons gamma par Fermi-LAT et MAGIC. Il s'agit de la toute première identification de source astrophysique de neutrinos, qui nécessite une confirmation.

Les deux objectifs scientifiques principaux étant associés à des gammes en énergie différentes, ils nécessitent une répartition différente des lignes de photodétecteurs (modules optiques). ORCA explore en effet des énergies inférieures à une dizaine de GeV alors que ARCA doit couvrir un domaine allant jusqu'au PeV. La collaboration a choisi de développer deux sites, un pour ORCA et un autre pour ARCA, en grande partie pour des raisons de soutiens financiers et politiques locaux. L'étude des neutrinos atmosphériques aura lieu grâce au détecteur ORCA installé sur le site français près de Toulon à 2450 m de profondeur avec pour objectif l'installation de 115 lignes de 18 modules optiques pour la phase 2. La physique d'ARCA aura lieu sur le site de Capo Passero en Italie à 3400 m de profondeur avec pour objectif l'installation de 2 fois 115 lignes pour la phase 2. Les volumes instrumentés de la phase 2 seront de l'ordre de 1 km<sup>3</sup> pour ARCA et de 0.004 km<sup>3</sup> pour ORCA. La première phase, en cours, et totalement financée, consiste à déployer 7 lignes ORCA et 23 lignes ARCA. Une première ligne ORCA, déployée en septembre 2017 a rencontré des problèmes de court-circuit et devrait être remplacée fin 2018. Dans le même temps, 3 lignes ARCA ont été déployées, dont une a également rencontré des problèmes. Le déploiement des lignes devrait reprendre mi 2019. La collaboration ANTARES a, dans ce contexte, décidé de prolonger la prise de données pour opérer un démontage en 2020 (au lieu de la date annoncée précédemment de 2017)

KM3NeT est le fer de lance européen de l'astronomie avec les neutrinos. Pouvoir observer n'importe quelle source sur le ciel justifie déjà l'existence de l'instrument ARCA, en complément du projet IceCube. Si la participation scientifique à ARCA est dans la continuité de l'expertise acquise sur ANTARES, ARCA doit être considéré comme une première étape, car sa taille est environ un ordre de grandeur trop faible pour raisonnablement espérer une statistique suffisante pour une interprétation astrophysique des détections attendues. L'avantage d'une meilleure résolution angulaire obtenue dans l'eau ne s'applique en outre qu'à des sources de petites tailles, et ne permet pas d'obtenir des performances notablement meilleures concernant, pas exemple, la mesure de neutrinos du fond diffus.

Au niveau instrumental, la France est impliquée directement dans le volet ORCA du projet à Toulon. La physique d'ORCA sur laquelle se concentrent les groupes français concerne un volet fondamental dans la compréhension des propriétés des neutrinos qui est la détermination de la hiérarchie de masse. ORCA est en compétition avec de nombreux projets en cours de développement dans le monde, tel que l'expérience Juno en Chine qui observera les neutrinos de réacteur et qui devrait avoir une sensibilité de l'ordre de 4 sigma pour la hiérarchie de masse d'ici 2026. Dans le paysage actuel des expériences prenant actuellement des données, la collaboration NOvA aux États-Unis étudie les neutrinos de faisceaux très longue distance venant de Fermilab. Du fait de la grande distance de parcours dans la Terre (810 km), NOvA possède un atout important qui pourrait permettre d'avoir une sensibilité à la hiérarchie de masse qui dépasserait les 3 sigma d'ici 2024 et d'offrir une mesure complémentaire et indépendante. La fenêtre de temps proposée par ORCA est ainsi propice et offre une opportunité très intéressante de fournir une des premières déterminations de la hiérarchie de masse d'ici 2023. Dans le contexte compétitif actuel, cette fenêtre est néanmoins étroite et impose que le planning de déploiement soit rigoureusement tenu, tout retard risquant d'être fatal.

Le calendrier de construction particulièrement serré impose en outre la mise en œuvre de plusieurs sites de production des modules optiques, dans des laboratoires de différents pays. Dans ce contexte et au vu des exigences de qualité requises et des difficultés spécifiques au déploiement d'un détecteur sous-marin, il importe d'être particulièrement vigilant sur la possibilité de respecter les rythmes de production annoncés. Les problèmes rencontrés avec la première ligne représentent une alerte sur les risques de dérive du calendrier.

### **H.E.S.S. et CTA**

L'astronomie gamma est indubitablement un domaine de recherche très actif avec des instruments dédiés au sol et dans l'espace. Il existe aujourd'hui essentiellement trois observatoires gamma de très haute énergie au sol: MAGIC, VERITAS, et H.E.S.S., héritier des projets français CAT (Cherenkov Array at Themis) et allemand HEGRA (High-Energy-Gamma-Ray Astronomy). H.E.S.S. a été le principal "découvreur" du ciel gamma de très haute énergie de ces dix dernières années (Fermi-LAT ayant quant à lui révolutionné le domaine en énergie immédiatement inférieur). En partie grâce à sa situation géographique lui donnant accès au Centre galactique et au ciel austral, mais également grâce à la performance des instruments et des analyses, H.E.S.S. a découvert environ deux tiers des sources connues à ce jour, et a mis au jour un bestiaire composé de sources très variées, pour lesquelles les mécanismes physiques à l'origine de l'émission gamma restent mal compris.

Les thèmes de recherche s'organisent autour des questions suivantes :

- où et comment sont accélérées les particules de haute énergie dans notre Galaxie ?
- quel est le rôle de ces particules dans le milieu interstellaire ?

- comment les mécanismes d'accrétion/éjection autour des trous noirs accélèrent-ils les particules ?
- que nous apprennent les photons gamma sur la matière noire et les lois fondamentales de la physique ?

L'IN2P3 est un acteur naturel de ce domaine puisqu'il l'a initié il y a environ 25 ans :

- d'un point de vue scientifique : il est nécessaire de faire appel à la physique des particules d'une part pour modéliser le développement des gerbes atmosphériques d'autre part pour étudier des mécanismes d'émission pouvant éventuellement faire appel à de la physique au-delà du modèle standard.
- d'un point de vue instrumental : les techniques adoptées dérivent fréquemment de la physique des particules.

Si près de 180 sources gamma sont à ce jour référencées, les flux observés n'autorisent une étude spectroscopique et morphologique que pour les objets les plus brillants du ciel. Le Cherenkov Telescope Array (CTA), projet de quatrième génération qui doit prendre la succession de H.E.S.S. doit permettre un gain d'un ordre de grandeur en sensibilité, un élargissement du domaine spectral, une amélioration de la résolution angulaire et une capacité accrue à détecter les sources transitoires. Le substantiel potentiel de découvertes concerne la physique galactique et extragalactique, ainsi que la physique fondamentale. CTA sera la référence dans le domaine. Le concept hérite de H.E.S.S., avec une approche multi-tailles de télescopes pour couvrir une gamme spectrale étendue : quelques grands miroirs (typiquement 4) captent la faible lumière Cherenkov émise lors de l'entrée dans l'atmosphère des "nombreux" photons de quelques dizaines de GeV, beaucoup de petits miroirs (de l'ordre de la centaine) couvrant un large angle solide captent l'importante quantité de lumière émise par les gerbes issues des très rares photons d'une centaine de TeV et des miroirs de taille intermédiaire permettent de compléter le spectre. Afin de pouvoir accéder à une large partie du ciel, deux sites seront équipés de ces télescopes, le site Sud au Chili, le site Nord aux Canaries.

Le financement du projet initial (près de 400 ME) n'est pas sécurisé et un projet réduit basé sur le financement promis par les divers instituts (250 ME) a été conçu. Le nombre de télescopes moyens et petits est réduit, et plus aucun grand télescope n'est prévu sur le site sud. La participation des États-Unis est incertaine actuellement. La demande au Haut Comité des Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR), vitale pour le financement de CTA, a été officiellement acceptée le 31 janvier 2017. La dotation sera d'environ 4 MEuros par an.

La caméra NeCTAr, dans CTA et déjà initiée dans H.E.S.S.II, est le fer de lance de la contribution française à CTA avec une participation importante du LPNHE et du LLR. Un autre sujet sur lequel la France a clairement une position de leader est l'analyse et la gestion des données, avec une coordination originellement au LAPP. Des motivations politiques ont conduit à un déplacement du centre de calcul vers l'Allemagne, mais l'organisation actuelle garantit l'impact et la visibilité du travail des équipes françaises. La participation du LAPP à la conception des arches de support de la caméra des grands télescopes est un défi technique et l'usage des fibres de carbone devrait permettre une percée dans ce domaine. Ce développement a un potentiel important. Enfin le LIDAR développée au LUPM est un instrument-clé pour permettre la maîtrise des effets systématiques liés à la variabilité de l'atmosphère. L'investissement, modéré, doit clairement être soutenu.

L'ensemble des cas scientifiques et le potentiel de découverte mérite amplement les améliorations actuelles de H.E.S.S. et le développement de CTA. La possibilité de mettre des contraintes pertinentes sur des problèmes de physique fondamentale, masse des axions ou invariance de Lorentz, avec une analyse spécifique mais sans donnée supplémentaire, est un atout significatif qui gagnerait à être davantage mis en avant, en particulier dans le cadre de la recherche de matière noire.

Le fonctionnement en mode observatoire ouvert à la communauté, en parallèle de la réalisation des programmes-clé par le consortium, va impliquer des changements notables. L'organisation de la gestion des données et de l'analyse semble en mesure de faire face à ces nouveaux usages. Le conseil estime préférable d'ouvrir CTA aux utilisateurs extérieurs dès le début de la phase de fonctionnement nominal afin que chacun se familiarise avec ce mode d'observation et que la communauté la plus large possible bénéficie des performances de CTA au plus tôt.

Fin 2018, le premier télescope de grande taille a été inauguré sur le site nord. Le développement du site sud a pris un retard important, la signature de l'accord de site avec les autorités chiliennes étant annoncée imminente pas encore effective. Dans ce contexte, la collaboration H.E.S.S. souhaite poursuivre l'exploitation de H.E.S.S. II en Namibie au-delà de la date initialement prévue de fin 2019 et est actuellement en négociations avec les différentes autorités.

### **Détecteurs d'ondes gravitationnelles**

La première détection d'ondes gravitationnelles par le consortium LIGO-Virgo a sans conteste été l'événement scientifique majeur de l'année 2016. Cette détection a couronné un énorme effort théorique et, surtout, expérimental de plus de 60 ans, et constitue une confirmation expérimentale éclatante d'une prédiction fondamentale faite il y a un siècle dans le cadre de la théorie de la Relativité Générale. Après les tentatives avec les barres résonantes, la technique interférométrique a permis d'atteindre ce résultat historique.

La détection successive en quelques mois seulement de plusieurs systèmes binaires de trous noirs de masse intermédiaire indique que les expériences au sol ont enfin atteint le seuil en sensibilité nécessaire, et augure d'une moisson de résultats au cours des prochains mois et des prochaines années. La découverte en 2017 d'une binaire d'étoiles à neutrons en coïncidence avec un sursaut gamma court et une kilonova renforce les débuts d'une astronomie multi-messagers.

Ces découvertes majeures sont le résultat de l'analyse de données conjointe par les deux groupes du consortium LIGO-Virgo. L'importance d'un réseau à plusieurs instruments a été démontré avec les détections au mois d'août 2017 permettant pour la première fois un gain important sur la position possible des sources. Ceci fut possible avec l'ajout de l'instrument européen Virgo aux deux détecteurs Advanced LIGO (aLIGO) aux États-Unis. Suite à la prise de données de 2017, Les instruments ont été modifiés pour gagner en sensibilité et ils effectueront une nouvelle prise de données d'un an à partir du début de l'année 2019. Le détecteur japonais sous-terrain Kagra devrait également rejoindre la prise de données O3 vers la fin de celle-ci augmentant encore les capacités du réseau. Ces différentes collaborations travaillent aussi à la préparation de la prochaine génération d'instruments en particulier le détecteur Einstein Telescope en Europe.

Ces découvertes ouvrent une fenêtre sur un nouveau domaine de la recherche, celui de l'astronomie gravitationnelle, avec l'accès à certains phénomènes invisibles avec les autres techniques. A son tour, cette astronomie-là se situe à l'intérieur de l'un des plus prometteurs domaines de la physique, celui de l'astronomie multi-messagers où les ondes gravitationnelles doivent être étudiées parmi les messagers cosmiques, c'est-à-dire les photons, les neutrinos, les rayons cosmiques chargés et l'antimatière cosmique. La combinaison des détections, positives ou négatives, s'avère très contraignante sur les phénomènes physiques en jeu ainsi que d'excellents tests de la relativité générale.

Le projet LISA, existant sous une forme ou une autre depuis la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, vise à étendre le domaine spectral de détection des ondes gravitationnelles aux fréquences comprises entre 10<sup>-4</sup> et 0.1 Hz. Cela permet d'une part d'accéder aux systèmes binaires de trous noirs supermassifs, tels que ceux que l'on attend lors de la rencontre de galaxies spirales, mais aussi d'étudier les systèmes binaires galactiques quelques mois, voire quelques années, avant leur fusion, ouvrant ainsi un domaine de recherche totalement nouveau. LISA sera selon toute vraisemblance l'un des projets scientifiques phares des prochaines décennies. La mission LISA Pathfinder, dont les résultats ont été rendus publiques en 2017, a démontré la maturité d'une partie des techniques envisagées et a permis de lancer la préparation de la mission LISA pour un décollage prévu en 2034.

## 6. Upgrade LHC et participation dans BELLE II

### 6.1. Contexte théorique et expérimental:

Le Modèle Standard (MS) possède un caractère hautement prédictif et a été testé tant au niveau de son contenu en fermions que de ses interactions depuis un demi-siècle de façon intensive, en particulier auprès de collisionneurs.

Aujourd'hui,

- le boson H a été observé et ses caractéristiques sont en très bon accord avec les attentes du MS. Le spin et la parité du boson H sont bien ceux attendus et la valeur mesurée de la masse est en très bon accord avec les attentes antérieures,
- de nombreux processus du MS ont été testés sur plus de six ordres de grandeur de façon satisfaisante,
- il n'y a pas d'indication de particules massives au-delà du MS par production directe. Mais certaines questions restent sans réponse et concernent notamment la grande variété des valeurs des paramètres :
- comment expliquer que le couplage de Yukawa de l'électron soit près de 350 000 fois plus faible que celui du quark top par exemple ou pourquoi y a-t-il trois générations ?
- un certain nombre de déviations concernant des processus de désintégration du quark *b* a été mesuré par les expériences BaBar, Belle et LHCb. Ces déviations, si elles sont confirmées par une statistique plus importante, suggèrent des différences dans les couplages des trois leptons chargés, différences qui ne peuvent pas être expliquées dans le cadre du MS,
- l'asymétrie particule/antiparticule présente au niveau du MS n'est pas suffisante pour générer l'asymétrie matière/antimatière observée au niveau cosmologique,
- l'origine de la phase d'inflation primordiale ne peut être expliquée dans le cadre du MS, y compris par la transition électrofaible comme espéré précédemment,
- les observations du rayonnement fossile, des grandes structures de l'Univers et de différents

processus astrophysiques ont abouti à établir un modèle cosmologique où le contenu énergétique de l'Univers est largement inexplicé par le MS avec environ 25% de matière non baryonique et 70% d'énergie noire qu'on ne peut naïvement identifier à l'énergie du vide.

On distingue deux approches pour tester le MS auprès des accélérateurs et éventuellement le mettre en défaut : les voies relativiste et quantique. La voie relativiste consiste à exploiter l'équivalence entre masse et énergie. Des collisions très énergétiques entre particules légères peuvent créer des particules lourdes dont on peut ensuite étudier la propagation et les modes de désintégration. La voie quantique consiste à s'appuyer sur la possibilité de passer par différents états intermédiaires au cours d'un processus. Il n'y a pas a priori de limite sur la masse des particules dans ces états intermédiaires, qui peuvent être plus lourdes que les particules initiales et finales mises en jeu.

De nombreux modèles de nouvelle physique (NP) ont été proposés pour étendre le MS dans des domaines d'énergie autour de l'échelle électrofaible. D'une part ces modèles cherchent à avoir des conséquences se démarquant du MS (nouvelles particules, déviations dans certains processus) afin de pouvoir être mis en évidence expérimentalement. D'autre part ces modèles doivent être en mesure de reproduire la vaste quantité de mesures obtenues jusqu'à présent dans la limite des incertitudes expérimentales et théoriques. On peut identifier des familles de candidats à la NP :

- les modèles supersymétriques ont longtemps été favoris car ils permettent de résoudre des problèmes théoriques liées à la valeur faible de la masse du boson H. Ils introduisent une symétrie supplémentaire qui aboutit à un doublement du spectre de la théorie. Cette supersymétrie est supposée brisée au-dessus de l'échelle électrofaible, de sorte que ces nouvelles particules supersymétriques ont des masses plus élevées que celles du MS;
- les théories de grande unification s'efforcent de rassembler les trois interactions fondamentales dans le cadre plus global d'une symétrie unique, à une échelle élevée d'unification. Ces théories ajoutent de nouvelles particules/généralisations au-delà des multiplets de particules contenant celles du MS et font éventuellement appel à des dimensions supplémentaires;
- les modèles composites font intervenir un secteur additionnel de fermions liés par une nouvelle interaction avec un couplage fort. Ils permettent de décrire le boson H comme une particule composite, et ainsi éviter les problèmes de stabilité de la masse de ce boson H. D'autres états composites doivent apparaître dans le spectre, et certains peuvent constituer des candidats pour la matière noire;
- les modèles à symétrie gauche-droite s'efforcent d'expliquer pourquoi le MS contient des interactions traitant les particules d'hélicités gauche et droite de façon différenciée pour l'interaction faible et de façon identique pour les interactions forte et électromagnétique. Ces modèles postulent qu'à une échelle d'énergie plus élevée l'interaction faible est englobée dans une interaction plus générale qui traite de façon équivalente les deux hélicités.

L'identification du boson H constitue l'aboutissement de l'étude du MS, mais marque aussi la fin d'une période où il était possible à chaque étape de déterminer la prochaine frontière en énergie où une découverte était prévisible, comme ce fut le cas pour les bosons W et Z, le quark top puis le boson H. La situation est à présent plus délicate, avec une visibilité bien moindre sur la conduite à tenir. En effet, des déviations sont observées dans des processus de basse énergie mais la production directe de nouvelles particules n'a pas été fructueuse jusqu'à

présent. Il convient ainsi de conserver l'esprit ouvert sur les approches à adopter.

Une telle situation se prête à l'analyse des résultats à l'aide de théories effectives, qui peuvent aider à identifier les directions les plus prometteuses pour des modèles de NP selon une approche basée sur des mesures de précision des propriétés des particules les plus lourdes du MS (W, Z, H, top, bottom). Les expériences de haute luminosité semblent ainsi une voie très prometteuse.

Après une première prise de données en 2010-2012 marquée par la découverte du boson H, différentes mises à niveau des expériences ont été programmées pour répondre aux contraintes dues à l'augmentation ultérieure de la luminosité au LHC. Fin 2018, le *Run 2*, avec une luminosité intégrée d'au moins  $120 \text{ fb}^{-1}$  pour les expériences ATLAS et CMS se terminera afin de permettre une première phase d'amélioration des détecteurs dont la motivation principale consiste à modifier le système de déclenchement pour conserver des seuils bas en énergie transverse malgré l'accroissement à  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de la luminosité instantanée dès 2021. A partir de 2026, le but de l'accélérateur, appelé désormais "High Luminosity LHC" (HL-LHC) sera d'atteindre une luminosité instantanée au pic de 5 à  $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , et de fournir une luminosité intégrée de  $3000 \text{ fb}^{-1}$ , soit un ordre de grandeur supérieur à ce qui aura été accumulé à cette date.

A cette époque certains détecteurs seront en fin de vie, essentiellement endommagés par les doses de radiation accumulées. De plus, l'augmentation d'un facteur 10 de l'empilement (près de 200 interactions toutes les 25 ns) aura pour conséquence un environnement pour le fonctionnement des détecteurs et une quantité de données à traiter très différents de ceux actuels pour les détecteurs ATLAS et CMS. Les défis principaux pour les détecteurs sont donc l'atténuation des effets d'empilement et la tenue aux radiations. Le remplacement des trajectographes est la priorité absolue de ces deux expériences en vue du HL-LHC. L'objectif est de terminer la phase de préparation et de construction des nouveaux détecteurs avant 2023 pour une installation entre 2023 et 2026.

La recherche de NP est également le but des expériences LHCb et Belle II. Depuis le démarrage du LHC, la physique du B est dominée par l'expérience LHCb. Les luminosités intégrées sont beaucoup plus faibles que celles des expériences ATLAS et CMS car la luminosité pic doit être réduite afin de pouvoir déterminer de façon non ambiguë le vertex de production des hadrons lourds (comportant un quark  $b$  ou  $c$ ). A la fin du Run2 une luminosité de plus de  $8 \text{ fb}^{-1}$  aura été collectée et certaines parties du détecteur de l'expérience LHCb vont être remplacées (disparition du déclenchement de premier niveau, remplacement du système de trajectographie). Avec cet upgrade l'expérience LHCb prévoit de recueillir plus de  $50 \text{ fb}^{-1}$  à la fin du Run4 prévue en 2029. Par ailleurs la collaboration LHCb travaille sur une proposition d'upgrade du détecteur afin de profiter de la très haute luminosité du LHC au cours du Run5 qui doit démarrer en 2031. Le but est de pouvoir prendre des données avec une luminosité instantanée de  $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  pour enregistrer un échantillon de  $300 \text{ fb}^{-1}$  car de nombreuses mesures seront encore dominées par l'incertitude statistique avec  $50 \text{ fb}^{-1}$ .

Belle II étudie également les hadrons lourds contenant des quarks  $b$  et  $c$  en les produisant avec une énergie dans le centre de masse de l'ordre de 10 GeV. Cette expérience s'inscrit dans la lignée des usines à B, BaBar et Belle, avec un principe similaire mais une luminosité environ 50 fois plus grande pour Belle II. Le détecteur Belle II est en cours d'assemblage. Il a été installé sur la ligne des faisceaux en avril 2017, sauf pour sa partie interne, le détecteur de vertex devant être inséré fin 2018. Les travaux de R&D instrumentale et de production des

sous-détecteurs ont donc déjà été réalisés. La prise de données pour les analyses de physique commencera à la fin de l'année 2018.

Les conditions expérimentales de Belle II et de LHCb sont très différentes puisque LHCb bénéficie d'une très grande section efficace, mais est limité par un environnement difficile, alors que les conditions expérimentales de Belle II sont plus faciles, mais la section efficace nettement plus faible. Ces différences, qui ont pour conséquence l'accès à des modes de désintégration différents mais aussi des incertitudes systématiques différentes, sont l'illustration de la complémentarité des deux approches.

## 6.2. Prospectives

L'avenir à court terme des expériences du LHC est tracé pour au moins les 20 années à venir qui se concluront par une période longue de prise de données à haute luminosité et avec une énergie dans le centre de masse de 14 TeV. Cette période, HL-LHC, permettra des mesures de précision et donc des tests toujours plus poussés du MS notamment dans les secteurs du Higgs, électrofaible, du quark top et de la physique du  $b$ . Par exemple, les couplages de Yukawa au boson de Higgs seront mesurés à quelques % pour ceux au photon, au W ou au Z et avec une précision entre 5 à 10% pour ceux aux leptons mu et tau ou ceux aux quarks  $b$  et  $t$ . Ces mesures bénéficieront également des grandes améliorations sur les prédictions théoriques mises en œuvre avec beaucoup de succès pour le LHC. Cette période donnera également accès à des mesures non accessibles jusqu'alors qui sont des tests fondamentaux du MS comme la production HH, ou la diffusion longitudinale de WW.

Au delà du HL-LHC, deux projets sont à l'étude au CERN. Un projet intermédiaire, HE-LHC pour High Energy – Large Hadron Collider, où juste après la fin de HL-LHC, les aimants du LHC pourraient être remplacés si la technologie en développement pour le Future Circular Collider (FCC) est mure. Ainsi en conservant le tunnel actuel de 27 km de long, l'énergie dans le centre de masse de la phase HE-LHC pourraient atteindre 27 TeV avec une luminosité supérieure ( $\times 4$ ) à celle de la phase HL-LHC. Cette nouvelle limite en énergie, permettrait une exploration d'un nouvel espace de phase pour la recherche directe de nouvelles particules et prendrait une dizaine d'années supplémentaires. Le projet suivant pour le CERN (la machine FCC) est plus ambitieux puisqu'il s'agirait de construire un nouveau tunnel d'une centaine de km de long pour atteindre une énergie dans le centre de masse de 100 TeV lors d'une collision entre paquets de protons. Cet accélérateur permettrait de repousser toujours plus loin la limite en énergie explorée pour la recherche de nouvelle physique. Par ailleurs, des études pour la construction d'une machine à électrons dans ce grand tunnel, FCC-ee sont aussi en cours. Le FCC-ee vise à collecter des luminosités intégrées multi- $\text{ab}^{-1}$  avec des énergies dans le centre de masse de 90, 160, 240 et 350 GeV, ce qui permettrait la production de  $10^{12}$  bosons Z,  $10^8$  paires WW,  $10^6$  bosons H et  $4 \cdot 10^5$  paires top-quark par an. Ces échantillons gigantesques permettraient de réaliser les tests ultimes du MS.

Avant que des décisions ne soient prises pour la construction du FCC, le HL-LHC et le HE-LHC pourraient bénéficier de la complémentarité d'autres expériences.

En effet, de même que les résultats de LHCb et Belle II seront complémentaires, un collisionneur électrons positrons n'atteindra pas la même énergie dans le centre de masse mais ces conditions de prise de données, bien moins complexes que dans l'environnement hadronique, permettraient d'atteindre des mesures dont les incertitudes systématiques seront distinctes de celles du LHC quelques soient la phase considérée. Une décision du Japon, qui se propose de l'accueillir, est attendue sur la construction d'un collisionneur linéaire électrons

positrons, l'ILC (International Linear Collider). L'énergie dans le centre de masse serait relativement basse, 250 GeV mais pourrait augmenter. Les couplages de Yukawa du Higgs seraient alors connus au pourcent et la masse du quark top pourrait être connue avec une précision de 100 MeV avec une énergie de 350 GeV dans le centre de masse. Il est relativement simple d'augmenter l'énergie dans le centre de masse d'un collisionneur linéaire, il suffit de le prolonger. Il n'y a pas de freins technologiques à la construction de l'ILC. Il n'y a pas non plus de doute sur l'intérêt de deux machines complémentaires hadronique et à électrons. L'obstacle à la construction est financier.

De plus, il faut ajouter le projet, plus avancé, de collisionneur électron-positon circulaire cette fois, le CEPC de 240 GeV et d'une circonférence de 50 à 70 km qui est en projet en Chine avec une construction prévue à partir de 2020. Cet accélérateur sera une usine à boson H de sorte que les incertitudes sur les couplages de Yukawa au H seront dominées par l'incertitude théorique.

Le CERN est également à la tête d'un projet d'accélérateur linéaire électrons positrons, le CLIC, à beaucoup plus haute énergie (3 à 5 TeV) et bien plus long terme également. Cette machine aurait les mêmes possibilités que les deux accélérateurs électrons positrons cités précédemment avec en plus la possibilité de recherche directe de nouvelle physique. Des développements technologiques sont encore nécessaires avant toute décision sur la construction de cet accélérateur.

Tous ces projets sont couteux et ils ne seront pas tous construits. Deux machines complémentaires seraient sans aucun doute un atout pour la discipline. Le Run-2 du LHC ne semble pas permettre d'orienter les choix de la communauté de physique des particules. Les résultats du Run-3 arriveront sans doute après la décision sur la construction de l'ILC. Ils orienteront les choix entre la construction de HE-LHC comme intermédiaire entre HL-LHC et FCC ou la construction directe du FCC avec une longue période de creux, le temps de la construction d'une telle machine.

## **7. Physique nucléaire sur des installations de type ISOL**

### **7.1. Contexte théorique et expérimental**

Actuellement, environ 3400 noyaux sont connus alors que 7000 à 8000 nucléides sont prédits par les modèles de physique nucléaire. Produire et étudier des noyaux avec un nombre très inhabituel de protons vis à vis du nombre de neutrons (les noyaux exotiques) est essentiel pour révéler les aspects cachés des interactions forte et faible dans le noyau atomique et la matière nucléaire. Certaines régions de la charte nucléaire ne seront pas accessibles expérimentalement, mais les propriétés estimées de ces isotopes sont extrêmement importantes dans la modélisation des évolutions stellaires et de la nucléosynthèse. Par conséquent, le développement de modèles théoriques permettant l'extrapolation de manière fiable de la structure nucléaire et des propriétés des réactions est un élément clé de cette recherche. Ces modèles doivent être confrontés à des mesures de hautes précision dans les noyaux exotiques produits en laboratoire.

Le conseil a examiné un pan particulier de la physique nucléaire et ne prétend pas dresser un panorama global et complet de ce vaste domaine. Le choix s'est porté sur les expériences liées à la technique ISOL (Isotope Separation On Line), c'est-à-dire à base de faisceau non accéléré, qui permettent d'aborder la physique nucléaire de basse énergie du point de vue

expérimental. Les faisceaux peuvent ensuite être accélérés mais la physique associée a été exclu de l'ordre du jour du conseil et par conséquent n'est pas présenté dans ce rapport de prospective.

Cette thématique s'intéresse à l'étude systématique des propriétés et décroissances de l'état fondamental et des états isomériques de durée de vie suffisamment longue des noyaux atomiques loin de la stabilité par la mesure de la masse, des moments électromagnétiques et par l'assignation des spin/parité. Ces grandeurs sont des observables pertinentes et sensibles pour l'identification, la caractérisation et la compréhension de l'évolution de la structure du noyau en fonction de l'isospin. Il s'agit de mesures de grande précision qui apportent des contraintes très fortes dans la comparaison avec les modèles théoriques les plus avancés en physique nucléaire.

Au-delà de la compréhension de l'interaction forte au sein de la matière nucléaire, les données de physique nucléaire sont des ingrédients dans la modélisation des collisions nucléaires jusqu'aux processus astrophysiques liés à la synthèse des éléments dans l'univers. Ainsi, les champs d'activité de la physique nucléaire couverts par l'IN2P3 en lien avec d'autres thématiques concernent essentiellement l'astrophysique et la nucléosynthèse, la physique des réacteurs ainsi que la physique des neutrinos. Les propriétés liées à la structure nucléaire ou aux caractéristiques de décroissance des noyaux radioactifs sont cruciales dans le déroulement de nombreux processus de nucléosynthèse tels que les sursauts gamma, l'effondrement de cœur de supernovae, les processus  $r$  et  $rp$  ; leurs études permettent de fournir des tests importants des modèles théoriques associés.

L'obtention de ces données nucléaires nécessite le recours à des techniques spécifiques, dont la méthode ISOL apparue en 1951 au Danemark. Elle a ensuite été développée au CERN avec l'installation ISOLDE qui a démarré il y a exactement 50 ans. La technique a continuellement progressé grâce à une R&D très dynamique sur les cibles et sources d'ions et aujourd'hui la quasi-totalité des éléments non réfractaires est disponible à ISOLDE. C'est le point de rencontre entre l'instrumentation, la palette de faisceaux ISOL disponible et la solidité et l'originalité de l'expertise locale qui rend une installation compétitive. La famille européenne des machines de production ISOL comprend ISOLDE au CERN, IGISOL à Jyväskylä et bientôt SPES à Legnaro, possédant plusieurs atouts et spécificités uniques, liés aux modes de production utilisés.

En France, il y a aujourd'hui deux installations de type ISOL en fonctionnement : SPIRAL1 au GANIL et ALTO à l'IPNO. SPIRAL1 utilise les faisceaux d'ions lourds du GANIL sur une cible de carbone. La production a jusqu'ici été limitée aux éléments gazeux (He, O, Ne, Ar, Kr) mais, à partir de 2018, l'utilisation d'une source FEBIAD permettra de produire de nouveaux faisceaux (Na, Mg, Al, P, K) et la panoplie pourra s'accroître à l'avenir. ALTO a été la première installation à utiliser la photofission (faisceau d'électrons de 50 MeV sur une cible de carbure d'uranium) comme mécanisme de production, ce qui procure des avantages notamment en termes de pureté des faisceaux délivrés aux expériences. L'intensité est volontairement limitée afin d'éviter le statut d'INB (installation nucléaire de base). Néanmoins, grâce à la meilleure pureté des faisceaux, ALTO est dans certains cas compétitif avec ISOLDE, instrument basé au CERN, et dans le futur avec SPES en Italie.

Les premiers faisceaux ISOL post-accélérés ont été fournis à Louvain-la-Neuve (installation désormais fermée) puis à SPIRAL1 et REX-ISOLDE en Europe. Aujourd'hui, avec

l'amélioration de cette dernière installation, HIE-ISOLDE, tous les faisceaux ISOLDE sont disponibles jusqu'à 10A MeV.

Les principales installations hors Europe sont TRIUMF au Canada et CARIBU à Argonne aux USA.

Selon la précision de la mesure, on accède à différentes questions de physique. La méthode ISOL peut contribuer à l'étude de ces cinq grandes questions :

- Comment évolue l'interaction nucléaire en fonction de l'isospin ?
- Comment peut-on expliquer les phénomènes collectifs à partir des mouvements individuels des nucléons ?
- Quelle est l'origine des éléments dans l'univers ?
- Quelle est notre sensibilité à la physique au-delà du modèle standard ?
- Quel est l'impact de la physique nucléaire sur les autres disciplines ?

Le programme scientifique dans lequel la communauté française a un rôle moteur se décline essentiellement dans deux régions de masse :

- Noyaux riches en neutrons de masse intermédiaire (incluant les produits de fission) auprès d'ALTO grâce à la photofission
- Noyaux légers riches ou déficients en neutrons grâce la fragmentation des faisceaux d'ions lourds des cyclotrons du GANIL à SPIRAL1.

Les chercheurs IN2P3 sont aujourd'hui impliqués dans des programmes expérimentaux auprès des installations européens (ISOLDE, IGISOL) et canadienne (TRIUMF) ainsi que l'instrument ALTO et SPIRAL1. L'instrumentation de pointe qui s'est développée, arrive aujourd'hui à maturité et la communauté commence à s'organiser pour la prise et l'exploitation des données.

Les mesures précises de masse se font de nos jours essentiellement avec des pièges de Penning dont l'archétype est ISOLTRAP à ISOLDE. Une nouvelle technique développée récemment à ISOLDE est le MR-TOF qui donne des mesures un peu moins précises mais nécessite un nombre d'ions plus réduit. Les deux systèmes peuvent également servir de purificateur de faisceaux. Les mesures de rayon, spin et moment se font à l'aide de spectroscopie laser dont il existe plusieurs types : détection par fluorescence ou détection d'ions et spectroscopie directement dans la source d'ions. Les expériences ISOL permettent également de mesurer des temps de vie des états fondamentaux et des états excités, essentiellement à travers la décroissance bêta des noyaux produits. Ces mesures se font à l'aide d'une station de décroissance souvent équipée d'un dérouleur de bande, de détecteurs bêta (plastiques ou silicium), gamma (germanium) et éventuellement neutron, dont un excellent exemple est BEDO installée à ALTO.

Les aspects expérimentaux et théoriques sont intimement liés. De nouvelles voies s'ouvrent en ce qui concerne les développements théoriques : calculs du modèle en couches à grande échelle, méthode Monte-Carlo appliquée au modèle en couches, degré de liberté dans la déformation hors axe au-delà du champ moyen pour les noyaux de nombre de masse impair, dynamique de la fission, calculs ab initio avec les forces déduites de QCD ; elles devraient offrir un éclairage nouveau. A titre d'exemple, les mesures de masses et de rayons de charge ont permis de mettre en lumière la contribution de l'interaction à trois corps dans les chaînes isotopiques dans la région du calcium à travers les calculs ab initio. De même, la mesure de la transition  $0^+ \rightarrow 0^+$  dans le  $^{80}\text{Ge}$  est importante dans la construction de l'interaction nucléon-

nucléon au voisinage du  $^{78}\text{Ni}$  dans le cadre du modèle en couches, qui en retour permet une description microscopique des évolutions de couches.

L'étude de la structure nucléaire est également en lien avec la physique des réacteurs et des neutrinos. Les propriétés de décroissance des produits de fission dans un réacteur et du spectre en énergie des anti-neutrinos produits sont importantes pour plusieurs aspects, notamment pour la connaissance de la puissance résiduelle du réacteur, pour la sûreté nucléaire et pour l'étude des propriétés fondamentales des neutrinos. D'une part, la connaissance des produits de fission émetteurs de neutrons retardés est fondamentale, étant donné que la fraction de neutrons retardés d'un réacteur influe sur son pilotage et que les prédictions pour les réacteurs innovants reposent notamment sur les propriétés de désintégration bêta des produits de fission. D'autre part, les propriétés de désintégration bêta des noyaux riches en neutrons, en particulier des produits de fission, jouent un rôle majeur dans l'estimation d'observables importantes pour la sûreté des réacteurs nucléaires par l'analyse de l'évolution des combustibles utilisés.

Concernant la physique des neutrinos, l'anomalie observée depuis quelques années entre le spectre en énergie des anti-neutrinos et les flux mesurés par les expériences de neutrino à moins de 100 m d'un cœur de réacteur pose une question importante à la fois sur la théorie des réacteurs, la physique nucléaire et la physique de particules. Cette anomalie a engendré une activité à la fois théorique et expérimentale pour vérifier ou infirmer l'existence de neutrinos dits stériles qui serait une explication à ces anomalies.

Dans le domaine de l'interaction faible, les projets et expériences menés visent à répondre aux principales questions :

- Existe-t-il des courants exotiques de l'interaction faible, de type scalaire et tenseur, ou faisant intervenir des interactions d'hélicité non-standard ?
- Quelle est la valeur précise de l'élément  $V_{ud}$  de la matrice de mélange de quarks Cabibbo-Kobayashi Maskawa, l'hypothèse CVC (conserved vector current) peut-elle être validée et la matrice CKM est-elle unitaire ?
- Y a-t-il violation de la symétrie par renversement du temps dans les processus de décroissance bêta ?

L'expérience LPCTrap, installée sur la ligne LIRAT du GANIL depuis 2005, a été conçue pour effectuer la mesure précise du paramètre de corrélation angulaire bêta-neutrino en décroissance bêta. Elle est basée sur le piégeage et le confinement des ions radioactifs dans un piège de Paul permettant la détection en coïncidence des particules bêta et des ions de recul. La valeur du paramètre est alors déduite de la forme du spectre en temps de vol des ions de recul qui reflète la distribution en énergie de ces derniers. L'erreur statistique relative sur le paramètre de corrélation est de 0,3% pour l'hélium  $^6\text{He}^+$  et de 0,15% pour l'argon  $^{35}\text{Ar}^+$ . Une détermination non-biaisée requiert une simulation très précise de l'ensemble des conditions expérimentales, et notamment des caractéristiques du nuage d'ions piégés. Ce travail d'analyse des effets systématiques est toujours en cours et il semble qu'obtenir une précision relative meilleure que 0,5% s'avèrera extrêmement difficile alors que les contraintes futures sur les couplages exotiques imposées par le LHC requièrent un niveau de précision de l'ordre de 0.1%.

## 7.2. Prospective

La mise en service de l'accélérateur LINAG, un LINAC installé au GANIL, est prévue pour 2018. Il accélérera des particules légères et des ions lourds à quelques MeV par nucléon avec

des intensités inégalées dans le monde. Une nouvelle source d'ions et une cavité accélératrice de type RFQ (quadripôle radio-fréquence) permettant l'accélération d'ions avec un rapport  $A/Q=7$  d'ici 5 ans pour pouvoir maintenir ces hautes intensités jusqu'à l'uranium est en discussion.

LINAG alimentera S3-LEB (S3-Low Energy Branch) pour la production des noyaux N~Z et des noyaux lourds et super-lourds produits par réaction de fusion-évaporation. S3, financé par un EquipEx, est un spectromètre novateur et performant mais complexe à mettre au point dont les premières expériences devraient avoir lieu vers 2020.

A plus long terme, l'installation S3-LEB et SPIRAL 1 alimenteront un nouveau hall dédié à la physique de basse énergie au GANIL. Appelé DESIR, ce projet est financé par un EquipEx.

LINAG est aussi conçu et dimensionné pour délivrer des faisceaux très intenses de deutons pour l'installation NFS (Neutrons for science) et pour le bâtiment de production de la toujours hypothétique phase 2 de SPIRAL2.

Le programme scientifique dans l'avenir est essentiellement dans trois régions de masse :

- Noyaux déficients en neutrons de masses intermédiaires,
- Noyaux lourds et superlourds, produits par le processus de fusion-évaporation utilisant les faisceaux de SPIRAL2/LINAG à S3-LEB
- Noyaux riches en neutron produits par photofission à ALTO

Grâce à un financement LabEx et région, trois nouveaux équipements sont en cours d'installation à Orsay/ALTO : MLLTrap qui est un piège de Penning pour les mesures de masse, LINO pour la spectroscopie colinéaire LASER et POLAREX pour l'orientation nucléaire à très basse température. MLLTrap et LINO ont vocation à rejoindre le hall DESIR au GANIL lorsque ce dernier sera finalisé. Une extension du bâtiment actuel d'ALTO, appelée PALTO, est proposé mais n'a pas été jugée prioritaire compte-tenu du contexte international et des échéances en temps.

Jusqu'ici, SPIRAL1 a surtout été dédié à la production de faisceaux post-accélérés par le cyclotron CIME. Seule la salle LIRAT, dédiée aux interactions fondamentales, est dévolue à la physique de basse énergie. Dans l'avenir, ces faisceaux essentiellement légers ( $A < 90$ ) auront vocation à être étudiés par les instruments de la salle DESIR.

L'ensemble S3-LEB est une installation du GANIL partiellement financée par le contrat ANR REGLIS3. L'installation est prévue en 2019. S3-LEB comprendra une cellule gazeuse pour arrêter et neutraliser les ions issus de S3 et permettra leur sélection en A et Z et leur spectroscopie laser. Une cavité RFQ permettra ensuite de regrouper ces ions pour les purifier dans un MR-TOF et pour mesurer leur masse. Par la suite, ces ions pourront être transportés dans le hall DESIR.

De nombreux instruments de pointe seront disponibles dans ce nouveau hall pour les mesures de masse, la spectroscopie laser ou les études de décroissance bêta. Plusieurs de ces instruments existent déjà (LPCTrap, MLLTrap, LINO, Monster...). La disposition sera modulable pour pouvoir accueillir des dispositifs non encore identifiés à ce jour. Pour diverses raisons, la construction du hall a été régulièrement retardée et la mise en service est aujourd'hui prévue pour 2023.

Enfin, le projet SPIRAL2-phase 2, si consolidé, devrait permettre de produire des faisceaux radioactifs très intenses de produits de fission en utilisant les faisceaux de deutons de LINAG. Ce projet serait unique au monde. La feuille de route comprend trois scénarios. Le scénario 1 est basé sur la pleine utilisation de SPIRAL2 au GANIL pour un budget supplémentaire estimé à 100 M€. Le scénario 2 permet de réaliser une partie des objectifs scientifiques pour un budget moindre, estimé autour de 20 M€, en produisant des fragments de fission avec des intensités moindres. Le scénario 3 correspond au cas où des retards importants et/ou le manque de financement imposeraient le repli sur les dispositifs existants simplement optimisés. Il peut également être une étape vers le scénario 1 ou 2 avec un coût minime, estimé à 1 M€. Naturellement les capacités expérimentales et l'intérêt scientifique décroissent fortement du scénario 1 au scénario 3.

Les instruments en cours de construction en France sont à l'état de l'art et incluent dans certains cas de nouvelles approches. S3-LEB sera unique dans les régions de masses  $N=Z$  et des noyaux lourds. Dès lors que cette installation produira son premier faisceau, la discussion sur SPIRAL2- phase 2 devra être reprise afin d'évaluer les diverses options à long terme. Considérant le contexte européen EURISOL-DF, le GANIL pourrait permettre à la France de jouer un rôle moteur dans ce projet.

La plus grande attention doit être portée à la disponibilité des faisceaux sur les installations françaises au regard des objectifs scientifiques. Les développements sur la partie cible/source entre ALTO et SPIRAL1 et 2 bénéficieraient d'une meilleure coordination et d'une collaboration plus étroite entre les divers acteurs.

Il est important de noter que, à long terme, la post-accélération de RIB est une extension essentielle pour répondre aux questions-clés et, en tant que telle, l'exclusion de cette option sur le long terme, ne semble pas la bonne stratégie.

Les enjeux scientifiques concernent les noyaux riches en neutrons de masse intermédiaire, plus spécifiquement ceux produits par fission des actinides en cours d'exploitation à ALTO et qui restent l'objectif à long terme du projet SPIRAL2-phase 2. En y ajoutant la région couverte par le projet SPIRAL2-phase 1 et S3-LEB autour de l'étain  $^{100}\text{Sn}$  et les régions des noyaux lourds et superlourds, un vaste programme de recherche est à venir pour comprendre, dans des conditions extrêmes d'isospin, les propriétés du noyau structurées par la présence (et la disparition éventuelle) des nombres magiques de spin-orbite protons 28 et 50 et neutrons 50 et 82. L'origine, du point de vue microscopique, des nombres magiques de type spin-orbite et de leur évolution loin de la stabilité reste par ailleurs amplement débattue.

Dans le domaine de l'interaction faible, le programme s'appuie sur une amélioration du dispositif expérimental, LPCTrap2, qui permettra d'augmenter la sensibilité statistique du dispositif. L'objectif final est une mesure avec une précision meilleure que 0,5% du coefficient de corrélation angulaire  $a\beta\nu$  dans la décroissance des noyaux  $^{37}\text{K}$ ,  $^{35}\text{Ar}$ ,  $^{33}\text{Cl}$ ,  $^{23}\text{Mg}$  et  $^{21}\text{Na}$ . En parallèle de ce projet LPCTrap, deux projets similaires visant la mesure du paramètre de corrélation dans la décroissance d'atomes  $^6\text{He}$  au CENPA (Université de Washington) et le paramètre  $A\beta$  dans la décroissance de l'argon  $^{35}\text{Ar}$  à ISOLDE (projet mené par l'IKS-Leuven) sont en cours. Le projet MORA a pour but de développer et tester un dispositif expérimental innovant permettant de rechercher une violation de type renversement du temps (TRV) par la mesure du paramètre de corrélation D dans la désintégration bêta d'ions  $^{23}\text{Mg}$  polarisés. Ce projet, entièrement financé par la Région Normandie, démarrera en 2018. Le dispositif consiste en un piège de Paul inspiré de l'actuel LPCTrap, en opération

après du GANIL, auquel est couplé un système laser permettant l'orientation des spins des noyaux suivant l'axe du piège. En parallèle, un système de détection inspiré du dispositif de la collaboration emiT sera développé.

A l'issue de cette étape, le GANIL et le LPC Caen disposeront d'un dispositif expérimental unique en son genre, présentant des performances et sensibilités inégalées pour la recherche de TRV, et plus généralement de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard. Des simulations montrent un gain d'un facteur de l'ordre 10 sur les contraintes issues de la mesure des paramètres de corrélation.

Le projet WISArD (Weak Interaction Studies with  $^{32}\text{Ar}$  Decay) enfin a pour premier objectif une amélioration des contraintes sur l'existence de couplages scalaires de l'interaction faible via la mesure très précise du paramètre de corrélation dans la décroissance de l'argon  $^{32}\text{Ar}$ . L'expérience WISArD va mesurer les coïncidences positron-proton et ainsi procéder à une mesure différentielle. En raison du recul du noyau fils suite à l'émission du positron et du neutrino, le proton est émis par une source en mouvement et est soumis à un effet Doppler. WISArD propose de remplacer la mesure de l'élargissement Doppler par une mesure du décalage Doppler. L'expérience est actuellement en cours d'installation à ISOLDE.

L'étude de transitions de Fermi super-permises  $0^+ \rightarrow 0^+$  initiée depuis plus de 25 ans permet aujourd'hui la détermination de  $V_{ud}$  avec une précision relative de  $2.2 \cdot 10^{-4}$ . Cette analyse nécessite, pour chaque noyau étudié, de combiner les mesures précises du QEC, de son temps de vie, et du rapport de branchement  $0^+ \rightarrow 0^+$  afin de déterminer la période comparée  $Ft$  de la transition. Le calcul des corrections théoriques (brisure de la symétrie d'isospin et corrections radiatives) permet ensuite la détermination de la valeur  $Ft$  corrigée qui, selon l'hypothèse CVC, est indépendante du noyau considéré et donne accès à  $V_{ud}$ .

Actuellement les transitions  $0^+ \rightarrow 0^+$  super-permises de 14 noyaux ont été déterminées avec une précision de l'ordre du pour-mille. Les groupes français du CENBG et du GANIL y ont contribué notamment par des mesures de la décroissance de  $^{10}\text{C}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{18}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{S}$ ,  $^{38}\text{Ca}$ ,  $^{42}\text{Ti}$  et  $^{62}\text{Ga}$ . Ces mesures ont été effectuées principalement sur des installations de type ISOL (TRIUMF, ISOLDE, JYFL, SPIRAL). Les mesures les plus difficiles sont celles des rapports d'embranchement des transitions super-permises qui impliquent des mesures de désintégration bêta avec une précision de l'ordre de  $10^{-3}$ . Pour acquérir cette capacité, un détecteur germanium a été étalonné en efficacité avec une précision de  $10^{-3}$  dans une collaboration entre le CENBG et le GANIL. Seuls deux détecteurs au monde atteignent une telle précision.

L'amélioration de la précision sur  $V_{ud}$  requiert la réduction de l'incertitude sur l'ensemble des mesures existantes et d'y adjoindre de nouveaux noyaux. Il est également crucial, sur le plan théorique, d'améliorer l'incertitude sur l'ensemble des corrections.

Les produits issus des réactions nucléaires contribuent à la puissance résiduelle du réacteur, c'est un point majeur pour des questions de sécurité et d'économie. Les mesures des  $\gamma$  et des  $\beta$  permettent de mieux suivre l'ensemble des produits de fission. Les mesures des fractions de neutrons retardés sont aussi très importantes pour le fonctionnement et le contrôle du réacteur. Des anti-neutrinos sortent également du réacteur ; ils peuvent donc être détectés pour suivre l'évolution du combustible mais également pour vérifier la non-prolifération nucléaire. Ces données prises à proximité des réacteurs se révèlent par ailleurs essentielles pour la physique fondamentale et l'étude des propriétés des neutrinos.

Il est crucial de mesurer précisément sur un large spectre d'énergie les  $\gamma$  mais les mesures existantes possèdent un biais non négligeable dans les données nucléaires et leurs applications, dû entre autres à l'effet Pandémonium. Ces mesures fiables et de grande précision doivent être de concert avec un effort théorique significatif afin de pointer les différentes composantes de l'interaction faible.

Le programme envisagé est basé sur l'obtention de plus de mesures TAGS pour améliorer les informations nucléaires dans les bases de données et quantifier précisément les incertitudes associées aux calculs dits de sommation. De nouveaux résultats issus des analyses de la campagne de mesures de 2014 effectuée à JYFL sont attendus en 2018. Une nouvelle expérience pour mesurer le spectre  $\beta$  venant de transitions interdites non uniques (projet E-Shape) a été initiée en collaboration avec Surrey (UK) et Valence (Espagne). La phase de R&D est en cours à Subatech. Des mesures supplémentaires TAGS à ALTO sont également prévues autour du  $^{132}\text{Sn}$  pour l'étude du processus  $r$ . Le laboratoire Subatech réalise actuellement les développements mécaniques nécessaires à l'installation de ce TAGS et fournira également le détecteur bêta adapté à la ligne de faisceau.

Les données nucléaires contribuent à améliorer la sûreté nucléaire, que ce soit pour les réacteurs en exploitation ou pour la gestion du combustible. L'impact sociétal de cette recherche est donc direct, et l'IN2P3 contribue à cet effort de compréhension toujours plus fine du comportement des noyaux d'intérêt.

## 8. Physique hadronique

### 8.1. Contexte

La physique hadronique s'intéresse à l'interaction forte dans toute sa complexité, soit dans le domaine dit "non-perturbatif". En raison de ce caractère, un proton ne peut être décrit, même approximativement, comme un simple assemblage de trois quarks.

La motivation est double. D'une part, la particularité des systèmes fortement corrélés est qu'ils ne se prêtent pas à une description simple. Pour cette raison, ils sont le siège de nouveaux phénomènes - par analogie, on peut faire référence à la supraconductivité en matière condensée - que l'on souhaite découvrir et étudier. D'autre part, il est naturel pour un physicien de souhaiter comprendre le proton, brique de base de toute la matière dite baryonique ou simplement "ordinaire".

La physique hadronique au CNRS se décline sous deux formes assez distinctes. D'une part la physique des collisions noyau-noyau ultra-relativistes consiste à étudier simultanément un grand nombre de hadrons, particules produites par l'interaction forte. Cette physique est aussi appelée physique des ions lourds, même lorsqu'elle s'applique à des collisions proton-proton. D'autre part, la physique hadronique proprement dite étudie directement le hadron avec une communauté environ deux fois moins nombreuse que celle attachée à la physique des ions lourds.

En ce qui concerne la physique des ions lourds, la situation a radicalement changé depuis une dizaine d'années avec l'avènement des calculs *ab initio* de QCD car les résultats expérimentaux peuvent à présent être confrontés aux prédictions sur la nature du plasma. La puissance actuelle des ordinateurs s'avère indispensable pour reproduire les masses des

hadrons légers ou d'autres observables plus complexes à l'aide de modèles phénoménologiques.

Une collision entre deux noyaux de plomb au LHC génère environ 30 000 hadrons dans un volume de plusieurs milliers de fermi-cube. Réaliser de telles collisions permet de créer des conditions inédites et ainsi d'observer des phénomènes dits émergents. Leur étude, au niveau de la compréhension théorique comme au niveau de l'analyse expérimentale, requiert des méthodes nouvelles et spécifiques par rapport à celles de la physique des particules "classique". La collision entre deux noyaux produit un système étendu gouverné par l'interaction forte qui instaure un équilibre thermodynamique local et éphémère avant de produire des hadrons par détente dans le vide. On s'attend à la création d'un plasma de quarks et de gluons très chaud, prédit par la théorie grâce aux calculs de QCD sur réseau, et on approche même la limite d'un comportement de type corps noir pour les collisions les plus violentes.

Les premières études expérimentales du plasma quarks-gluons ont été conduites au SPS à partir de 1986 - on a récemment célébré les 30 ans d'ions lourds au CERN. La nature de ce plasma a été mise en évidence à RHIC au États-Unis en 2000, et c'est principalement au LHC que se poursuit actuellement cette recherche. Les analyses en physique des ions lourds se concentrent essentiellement sur l'expansion hydrodynamique, les *jets* dans le plasma et les quarks lourds.

Des densités d'énergies extrêmes peuvent aussi être réalisées dans les collisions proton-proton et proton-noyau, surtout si on regarde les événements de haute multiplicité, car ici les volumes en question sont beaucoup plus petits. Mais il était impensable que ces "petits systèmes" puissent s'équilibrer. Or, très récemment, plusieurs mesures ont montré la possible présence d'effets collectifs dans les petits systèmes.

L'expansion hydrodynamique considère l'ensemble des particules pour réaliser la modélisation hydrodynamique du système sachant que la thermalisation est, au mieux, locale. Étonnamment, une description en termes de fluide est pertinente alors que la taille du système est petite car la très faible viscosité dans un régime de couplage fort compense l'effet de taille. L'étude des corrélations entre les hadrons produits par la désintégration du plasma donne pour le moment des résultats en accord avec les prédictions hydrodynamiques.

Les *jets* sont définis comme les gerbes de particules produites par l'éjection d'un quark ou d'un gluon de haute énergie par un processus de cascade d'émissions de gluons. Lorsque le *jet* est émis dans un plasma, et non dans le vide, les gluons peuvent être émis avec un angle important par rapport à l'axe du jet. Ces particules sortent alors du *jet* qui rassemble, par construction, des particules quasi-colinéaires : le *jet* semble perdre de l'énergie. Ce mécanisme de perte d'énergie présente des analogies avec la turbulence en mécanique des fluides.

Les quarks lourds *c* et *b* permettent une autre approche de l'étude du plasma quarks-gluons. Des phénomènes d'écrantage lors de la création de paires quark-antiquark doivent être pris en compte. Mais l'énergie des collisions plomb-plomb étudiées par les expériences du LHC est telle qu'une seule collision peut produire plusieurs paires dont les éléments pourraient ensuite se recombinaison, notamment à faible quantité de mouvement. Les deux effets sont à prendre en compte pour étudier la dynamique des quarks lourds dans le plasma quarks-gluons.

En ce qui concerne la physique des hadrons, elle se décline principalement autour du spectre hadronique et de la structure du hadron. Le spectre hadronique résulte du confinement de l'ensemble des quarks qui constituent le hadron. La classification se fait selon leur nombre quantique (saveur, spin, parité et masse). Au cours de la dernière décennie, des hadrons dits exotiques, interprétés comme des tetraquarks ou des pentaquarks, ont été découverts et sont le sujet de plusieurs programmes de recherche dédiés.

Enfin des études se concentrent sur la structure interne de l'unique hadron stable, le proton. La fonction de structure donne la répartition de l'impulsion du proton en ses différents partons. Son calcul *ab initio* est un nouveau domaine théorique en pleine expansion alors que les recherches expérimentales visent à donner une image pluri-dimensionnelle de la dynamique des constituants du nucléon. Notamment, les Distributions de Parton Généralisées permettent de corrélérer l'impulsion longitudinale et la position transverse des partons.

En France, 50 chercheurs et enseignants-chercheurs permanents émergent dans ce domaine, les deux-tiers étant au sein de la collaboration ALICE. Ils encadrent actuellement 20 doctorants et collaborent avec 10 post-doctorants dans 8 laboratoires de l'IN2P3 : l'IPHC (Strasbourg), l'IPNL (Lyon), l'IPNO (Orsay), le LAL (Orsay), le LLR (Palaiseau), le LPC (Clermont-Ferrand), le LPSC (Grenoble) et Subatech (Nantes).

La communauté théorique est importante et on notera que l'algorithme de reconstruction des *jets* utilisé par toutes les collaborations du LHC, que ce soit lors des collisions proton-proton ou plomb-plomb, a été développé en France et est l'objet de la publication de physique théorique des hautes énergies la plus citée des dix dernières années.

Les collaborations en physique hadronique dans lesquelles l'institut est impliqué : ALICE, CMS et LHCb installés au LHC ainsi que JLab aux États-Unis et FAIR en Allemagne.

## **8.2. Infrastructures : situation en Europe et au niveau international**

La physique hadronique est présente depuis de nombreuses années en France avec une participation au SPS (CERN) puis au RHIC (États-Unis). Aujourd'hui les efforts en physique des ions lourds se concentrent à nouveau au CERN dans trois des quatre principales expériences installées au LHC : ALICE, CMS et LHCb. Le LHC délivre essentiellement des collisions proton-proton avec, environ un mois par an, des collisions d'ions lourds plomb-plomb, ou plus rarement proton-plomb.

Il existe un programme en physique hadronique au LHC jusqu'en 2029, qui inclut donc la phase à haute luminosité. Des projets à partir de 2030 ont été déposés ou sont en préparation par les diverses expériences. Par ailleurs, des études sont en cours pour envisager une machine dédiée à plus haute énergie à un horizon encore plus lointain. Un groupe a été créé au CERN pour établir un plan stratégique basé sur une large consultation de la communauté avec des ateliers régulièrement organisés.

En Allemagne, FAIR bénéficie d'un nouveau souffle avec sa construction sur le site de GSI après plusieurs retards du projet. Le démarrage est planifié pour 2025.

Au niveau européen, une réponse à l'appel à projets HORIZON 2020 autour de la physique hadronique est en préparation avec un budget de 10 millions d'€ : Hadrons Physics Horizon 2018. Deux mille personnes ont été contactées dans ce cadre. L'action structurante a permis

de fusionner certains projets. La France participe à 13 des 27 projets issus des 52 propositions et en coordonne 9 ; ces projets seront très bientôt publics.

Des expériences sont également en place en Asie mais la France n'y participe pas, elles ne sont donc pas présentées ici.

Outre-Atlantique, des activités importantes ont lieu à JLab aux États-Unis avec une participation française. Sa suite naturelle serait un collisionneur électron-ion (EIC). Le projet, fortement soutenu par la DOE, semble prendre forme et deux options sont actuellement clairement identifiées. Le CEA-IRFU affiche un intérêt fort pour ce projet et une partie importante de la communauté européenne de physique hadronique est mobilisée autour de ce collisionneur malgré le contexte budgétaire difficile.

### **8.3. Collisions d'ions lourds dans l'expérience ALICE au LHC**

L'expérience ALICE exploite les collisions noyau-noyau, proton-noyau et proton-proton du LHC pour déterminer les propriétés fondamentales d'un plasma de quarks et de gluons (QGP). Le potentiel de l'expérience pour mesurer, identifier les particules et faire la physique à petites impulsions transverses est relativement unique et dédié à l'exploration de la physique des ions lourds.

Les mesures effectuées par ALICE avec les données des *runs* 1 et 2 sont compatibles avec les résultats attendus dans le cas d'un équilibre thermodynamique avec potentiel chimique nul. Les mesures des coefficients harmoniques qui quantifient les anisotropies azimutales de la production de particules, pour les hadrons légers et lourds, sont compatibles avec les calculs hydrodynamiques en considérant une viscosité très faible (proche de la limite théorique). Donc il s'agit certainement d'un milieu en interaction forte extrêmement intense. Une autre observation importante a été la perte d'énergie des *jets*, attribuée à l'interaction de partons traversant le milieu. Les mesures sur la production de  $J/\psi$  sont compatibles avec la compétition entre le mécanisme de dissociation thermique des états du charmonium et un mécanisme de recombinaison de quark et anti-quark charmés initialement produits par deux processus durs distincts.

Plus spécifiquement, ALICE a mesuré de façon systématique pour les différents systèmes (pp, p-Pb, Pb-Pb) les spectres en impulsion transverse des hadrons légers chargés et neutres (incluant les photons), des noyaux légers, des mésons D et des charmonia. Au niveau des *jets*, depuis le *run* 2, ALICE a pu mesurer des observables différentielles, comme la production semi-inclusive de *jets*, pour étudier l'élargissement angulaire inter- and intra-*jets* dans les collisions Pb-Pb centrales.

Les collisions impliquant des petits systèmes, pp et p-Pb, ont créé une surprise. En effet, des observations faites dans les mesures de corrélations de particules multiples, dans le secteur des saveurs légères notamment, ont montré la possible présence d'effets collectifs. La même conclusion a été faite en ce qui concerne la production d'étrangeté. Un autre résultat majeur concerne la présence de fortes corrélations entre la production de sondes dures (quarkonia et charme ouvert) et la multiplicité globale qui s'interprète en termes d'effets non-QGP.

La France est un acteur important depuis les débuts de l'expérience ALICE et a contribué de manière significative à sa construction, son exploitation et maintenant au développement des améliorations en vue du *run* 3. Les équipes françaises ont mené un programme de physique

important sur des sujets majeurs pour la compréhension des propriétés du QGP avec des analyses des données issues des *runs* 1 et 2.

Six laboratoires de l'IN2P3 sont impliqués et membres de la collaboration ALICE: l'IPHC, l'IPNL, l'IPNO, le LPC, le LPSC et SUBATECH, qui rassemblent 24 chercheurs permanents CNRS, 11 enseignants-chercheurs, 4 post-doctorants et 11 doctorants.

Les principales thématiques scientifiques étudiées par les physiciens de l'IN2P3 concernent la physique des quarkonia (IPNO, LPC, SUBATECH, IPNL), la physique de l'étrangeté (IPHC) et des saveurs lourdes ouvertes (IPHC, IPNO, LPC), la physique des photons directs (LPSC, SUBATECH), la physique des *jets* (LPSC) et la physique des di-leptons de basse masse (IPNL). Les laboratoires de l'IN2P3 sont engagés aussi de façon importante dans le projet d'amélioration de l'expérience pour les *runs* 3 et 4. Avec un taux de collisions plus de dix fois supérieur en Pb-Pb au taux actuel, le programme de physique se resserrera autour des mesures de sondes rares du QGP : processus durs ou processus mous tels que la physique des saveurs dans les hautes multiplicités pour les petits systèmes ou encore la production des noyaux légers. Pour fonctionner dans ce nouveau régime de collisions, de nombreux changements sont prévus et vont concerner presque tous les éléments du détecteur. Dans ce cadre, les physiciens de l'IN2P3 sont porteurs du projet MFT (Muon Forward Tracker) et les laboratoires impliqués ont une charge prépondérante dans le financement et la construction de ce détecteur (IPNL, LPC, SUBATECH). Les physiciens et ingénieurs des laboratoires de l'IN2P3 sont également fortement impliqués dans la construction de la nouvelle électronique des stations de trajectographie (IPNO, SUBATECH) et d'identification (LPC, SUBATECH) du spectromètre MUON et de l'assemblage de modules du nouveau trajectographe ITS (IPHC). Le LPSC contribue aux améliorations des amas calorimétriques EMCAL/DCAL et, avec son groupe d'électronique, participe au développement du module de lecture des données commun à l'ensemble des détecteurs ALICE.

Au niveau du *tracker* interne, le nouvel ITS consistera en sept couches de détecteurs au lieu de six et couvrira une gamme de pseudo-rapacité un peu plus large avec un budget matériel grandement réduit et une résolution spatiale améliorée. L'efficacité de reconstruction des traces sera également fortement accrue. L'IPHC Strasbourg assemblera 20% des modules dédiés aux 4 couches extérieures. La contribution financière de l'IN2P3 au coût du projet, hors R&D, est de 800 k€. L'IPHC est également en charge de la coordination de l'environnement logiciel pour la simulation, l'étalonnage, l'alignement, le contrôle qualité des données, la reconstruction des traces des particules et l'identification des vertex secondaires.

L'électronique frontale (MUON et TPC) sera remplacée par une nouvelle électronique de lecture basée sur le circuit SAMPa également utilisé pour la TPC. Les données sont véhiculées vers les châssis d'acquisition SOLAR pour ensuite atteindre l'infrastructure commune d'acquisition CRU. L'IPNO conçoit et produit les 20 000 cartes DualSampa. Les prototypes finaux seront validés au premier semestre 2018 et le début de la production est prévu pour fin 2018/début 2019. La contribution financière de l'IN2P3 au coût total, hors R&D, est de 646 k€.

Concernant le MUON ID, un tiers des détecteurs RPC sera remplacé (INFN Turin) avec le passage à une électronique frontale avec amplification (projet FEERIC). Ces cartes FEERIC ont été conçues et produites au LPC. SUBATECH prend en charge le remplacement de toute l'électronique de lecture, soit 250 cartes numériques complexes, en liaison avec les cartes de lecture CRU. Le coût à la charge de l'IN2P3 est de 430 k€.

Pour le MFT (Muon Forward Tracker), composé de 10 plans de 5 disques, chacun équipé de capteurs silicium à pixels ALPIDE, l'objectif est d'augmenter de manière très significative la résolution de pointage des traces des muons au niveau du vertex d'interaction primaire et ainsi de discriminer l'origine des états du charmonium. La coordination du projet est assurée par la France. Les laboratoires français impliqués sont : SUBATECH, LPC, IPNL et CEA-IRFU. En 2017, 35 personnes de l'IN2P3 travaillent sur ce projet : 21 ingénieurs et techniciens, 11 physiciens, 2 post-doctorants et un doctorant. La contribution financière de l'IN2P3 au coût du projet, hors R&D, est de 1 370 k€.

Enfin ALICE a choisi de changer la méthode de lecture des données pour passer d'un mode déclenché à un système de lecture en continu. Le logiciel associé à la carte de lecture CRU de ce nouveau système est en cours de développement sous la responsabilité du LPSC.

L'ensemble de ces améliorations va permettre de donner des informations supplémentaires sur plusieurs aspects de physique, notamment dans le secteur des saveurs lourdes pour la réponse du charme à la dynamique collective du milieu, l'hadronisation du QGP, la perte d'énergie, la dynamique des charmonia dans le QGP, la thermalisation des quarks lourds dans le milieu et le transport des quarks lourds par le QGP. Les photons apporteront plus d'informations sur la dynamique initiale de la collision et permettront l'étude de nouvelles observables multi-paramétriques.

L'étude des *jets* bénéficiera de mesures plus adaptées, comme *jet* et un photon direct. De nouvelles observables seront aussi exploitées. Plus généralement, pour les collisions proton-proton et proton-noyau il sera possible d'effectuer des mesures multi-différentielles, en particulier le taux de production en fonction de la multiplicité pour toute sorte de particule.

#### **8.4. Collisions d'ions lourds dans l'expérience CMS au LHC**

L'existence du plasma quarks-gluons a été prévue par la chromodynamique quantique dans les années 1970. Il peut être créé dans les collisions d'ions lourds à très haute énergie. Les premières expériences ont eu lieu dans les années 1990 à l'AGS à Brookhaven et au SPS au CERN. La suppression du  $J/\psi$  dans l'expérience NA50 du CERN a été proposée comme première preuve expérimentale. Le LLR était moteur dans cette expérience.

Dans les années 2000 au RHIC, cet instrument ayant permis un saut en énergie d'un facteur 10 par rapport au SPS, plusieurs signatures simultanées ont conforté la découverte du QGP. La surprise a résidé dans le fait que les quarks et les gluons sont en très forte interaction : le « plasma » ressemble plutôt à un liquide ! Le LLR était fortement impliqué au RHIC.

L'étape suivante est le LHC avec l'expérience ALICE dédiée aux ions lourds. Le LLR ne s'implique pas dans cette expérience mais une petite équipe, composée actuellement de 3 chercheurs, 2 postdocs et 2 étudiants, s'investit dans CMS ions lourds.

Pour l'étude des collisions d'ions lourds, CMS a des capacités complémentaires d'ALICE, en particulier la couverture angulaire, la bande passante d'acquisition (pour enregistrer des phénomènes rares) et les performances de reconstruction pour les *jets* et les muons. Les inconvénients sont la faible capacité d'identification des particules et la faible acceptance à basse impulsion transverse.

L'augmentation en luminosité et en énergie du *run 2* a donné de très nombreux nouveaux résultats, avec en particulier pour CMS les *jets* complètement reconstruits, les bosons électrofaibles, les upsilons, les quarks b et même le quark top. Une surprise est que certaines manifestations attribuées au plasma quarks-gluons ont été observées en collisions proton-noyau. Les enjeux scientifiques associés à ces résultats sont importants : le confinement des quarks et des gluons en hadrons qui leur confère leur masse, l'une des transitions de phase dans l'univers primordial et l'équation d'état de la matière nucléaire dans des conditions extrêmes.

L'équipe a eu une très forte production scientifique avec 14 articles avec contribution significative au *run 1* et au moins 7 prévus avec les données du *run 2* ainsi que des responsabilités importantes au sein de l'expérience.

Le projet est déployé sur cinq sujets d'analyse. Il n'est pas prévu de contribution instrumentale mais le LLR contribue par ailleurs de façon importante aux améliorations de CMS. Les sujets sont : mesurer la dépendance en centralité de la suppression des trois  $Y(nS)^3$  pour estimer une température du plasma,; mesurer le flot elliptique des upsilons et le comparer à celui du  $J/\psi$ , ; mesurer la production associée photon + *jet* en identifiant la saveur du *jet* ; mener des recherches exploratoires sur les hadrons exotiques comme le méson  $B_c$  : il y a compétition ici entre ALICE, CMS et LHCb, aucun de ces détecteurs n'étant idéal pour cette recherche; participer aux premières mesures du quark top et mesurer le *quenching* des quarks b. L'équipe pense qu'il y a intérêt à poursuivre les mesures d'ions lourds lors du *run 4* avec le HL-LHC à partir de 2026 mais il n'y a pas encore de programme précis établi.

## 8.5. Collisions d'ions lourds dans l'expérience LHCb au LHC

La production de quarks lourds par collision d'ions lourds a pour objectif scientifique l'étude du confinement en couleur des quarks. C'est un projet ambitieux car plusieurs phénomènes, qui sont seulement partiellement compris actuellement, contribuent à la phénoménologie de ce sujet. C'est le cas en particulier du plasma quarks-gluons, de la régénération statistique et des effets de matière nucléaire froide.

Afin de séparer les effets influençant la production de  $J/\psi$  dans un environnement à haute multiplicité, il est important d'effectuer les mesures à bas et haut centres de masse. Les plus hautes énergies et les plus grandes multiplicités des particules sont atteintes au LHC lors des collisions plomb-plomb, étudiées par l'expérience ALICE naturellement, mais également par ATLAS et CMS. Le détecteur LHCb ne peut pas actuellement faire face à la multiplicité particulièrement élevée résultant de ces collisions mais est bien adapté à l'étude de la production des quarks *bottom* et charme à des énergies correspondant aux plus faibles centres de masse.

L'expérience LHCb offre de nombreux avantages : elle peut opérer à la fois en mode collisionnel (proton ou noyau) et en mode cible fixe grâce à une cible gazeuse, elle couvre une région arrière bien adaptée à la mesure des particules produites par ces réactions, son détecteur de vertex peut différencier la production de charme prompt et la décroissance de ces quarks à partir de mésons *bottom*. Le dispositif SMOG permet d'injecter du gaz noble, du néon par exemple, dans le vide du LHC pour le fonctionnement en mode cible fixe.

Deux groupes français, au LLR et au LAL, ont initié l'utilisation d'une cible gazeuse pour ions lourds à LHCb. Ces groupes jouent un rôle important et visible dans ce projet en dépit de

leur taille modeste (2 chercheurs permanents et 3 post-doctorants), comme en témoigne leur fonction de *run coordinator* et les nombreuses invitations en conférences internationales.

## 8.6. Physique hadronique à Jefferson Laboratory

Jefferson Laboratory est un laboratoire américain situé sur la côte Est des États-Unis à Newport News. L'accélérateur CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) actuellement en fonctionnement dans ce laboratoire délivre un faisceau d'électrons de 12 GeV à quatre halls expérimentaux ; l'IN2P3 participe aux expériences des Halls A, B et C. L'énergie des faisceaux d'électrons, auparavant de 6 GeV, a été portée à 12 GeV en 2014. Différentes cibles et détecteurs permettent de produire des données dans diverses conditions.

L'objectif des prises de données dans des configurations variées est la compréhension de la structure des hadrons, à savoir comment ils sont formés par les quarks et les gluons qui les composent. La structure en partons du nucléon est décrite par le formalisme des distributions de partons généralisées (GPD) que l'on cherche à connaître au mieux dans différents régimes cinématiques. Les GPD permettent de comprendre les corrélations entre différents partons. Quatre GPD dépendent chacune de trois variables cinématiques indépendantes. Expérimentalement, il s'agit d'envoyer des électrons sur des cibles de protons ou de neutrons avec un transfert d'énergie très grand par rapport à la masse du nucléon cible. CEBAF fournit un faisceau d'électrons polarisés de haute intensité et à haut cycle utile adapté aux faibles sections efficaces de ces réactions. Différentes observables sont l'objet des mesures du groupe de l'IPNO engagé à Jefferson Lab, par exemple avec les spectromètres à haute résolution du Hall A pour des sections efficaces précises dans un espace des phases choisi ou avec le détecteur à grande acceptance CLAS du Hall B pour couvrir la mesure de section efficace sur un grand espace de phase. Ces mesures ont donné lieu à plusieurs publications.

Lors du saut en énergie du faisceau d'électrons, de 6 à 12 GeV, les détecteurs ont été adaptés avec des contributions de l'IN2P3, avec notamment la construction et la mise en route du Central Neutron Detector pour CLAS12. D'autres développements instrumentaux sont en cours et viennent s'ajouter à l'exploitation des données collectées à 12 GeV. En effet, l'IPNO participe au développement nécessaire au détecteur Neutral Particle Spectrometer (NPS) du Hall C pour une prise de données prévue en 2020. Ce détecteur est un défi technologique en soit car il doit accepter un taux de radiations extrêmement important. De même, le groupe s'engage dans la construction d'un nouveau détecteur de fragments nucléaires, appelé ALERT (A Low Energy Recoil Tracker), pour équiper CLAS12 qui est le successeur de CLAS. Le groupe est investi dans le calorimètre de l'expérience Heavy Photon Search (HPS). Cette expérience de recherche d'un photon lourd, démarrée en 2014, a pour but de trouver une nouvelle particule, hors du modèle standard, appelée « photon lourd » dans le secteur de masse de 20 à 1000 MeV. Le photon lourd serait un nouveau boson de jauge  $U(1)$  avec un couplage réduit à la charge électrique due au « mélange cinétique » avec le photon classique.

A plus long terme, le groupe souhaite avoir un rôle important auprès du futur collisionneur électron-ion EIC dont des études de conception sont actuellement en cours. La communauté liée à ce projet commence à se structurer et le groupe de l'IPNO y participe à travers des simulations pour comprendre la précision accessible avec les futures mesures mais aussi avec de la R&D autour d'un calorimètre. L'objectif des collisionneurs électron-ion, à hautes énergie et luminosité, est d'accéder à une bien meilleure connaissance des gluons par des mesures ultra-précises de la structure du nucléon dans une région cinématique où la mer de quarks et gluons domine et où les phénomènes de saturation sont importants. De plus, les gluons ne sont pas directement accessibles par les expériences sur cible fixe car ils

n'interagissent qu'avec les quarks. Cet accélérateur ouvrirait un nouveau pan de la physique hadronique encore peu exploré.

## 8.7. Physique hadronique à GSI/FAIR

Le projet FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) est en construction sur le site de GSI à Darmstadt, en Allemagne et sera réalisé en deux temps. La phase 1 de FAIR utilisera le synchrotron actuel comme injecteur d'un nouveau synchrotron SIS100 pour délivrer des faisceaux de protons jusqu'à 29 GeV et de nickel et d'or jusqu'à presque 15 GeV/nucléon. Un anneau de stockage permettra de créer un faisceau secondaire d'antiprotons d'énergie comprise entre 1.5 et 15 GeV et de relativement faible luminosité ( $10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Cet ensemble est en construction et les expériences doivent être opérationnelles en 2025. Au-delà, une phase 2 est programmée mais non encore financée. Elle comprendra un synchrotron supplémentaire pour atteindre 35 ou 40 GeV/nucléon et un anneau de pré-stockage pour augmenter la luminosité des réactions antiproton-proton d'un facteur 20. Le détecteur HADES est actuellement utilisé et devrait le rester jusqu'en 2021, voire au-delà pour 3 ou 4 mois par an. La phase 0 actuelle de FAIR consiste à préparer des points de vue scientifique et technique les expériences prévues à FAIR.

FAIR s'articule autour de quatre piliers : APPA (Atomic, Plasma Physics and Application), NUSTAR (NUclear Structure, Astrophysics and Reactions), CBM (Compressed Baryonic Matter) et PANDA (AntiProton ANihilation at Darmstadt). Le pilier CBM intègre sur son site deux dispositifs, un nouveau détecteur CBM et le détecteur HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer) actuellement utilisé à GSI. HADES joue ainsi un rôle particulier dans ce cadre pour l'expérience CBM.

L'expérience HADES a été conçue pour étudier la matière hadronique dense à température modérée. La détection des paires électron-positron avec le spectromètre HADES permet l'étude des modifications des mésons vecteurs dans la matière nucléaire lors des collisions noyau-noyau ; ces travaux ont permis la mise en évidence de la distorsion de la fonction spectrale du méson et une très forte absorption du méson dans les collisions proton-noyau. Les mesures à plus haute énergie avec SIS100 permettront la production du  $\Phi$  et de particules étranges. En parallèle, les mesures de certaines réactions élémentaires permettent de fournir des sections efficaces de référence pour l'étude de la matière nucléaire. L'étude des résonances baryoniques et de leur décroissance électromagnétique est également particulièrement importante car elle ouvre la voie avec SIS100 à une meilleure connaissance des hyperons qui jouent un rôle important dans les étoiles à neutrons. Le programme expérimental d'HADES se poursuit et sera ensuite intégré à FAIR. Le groupe de l'INPO a une expertise bien reconnue dans la communauté pour l'étude des résonances baryoniques et leur décroissance électromagnétique mais l'équipe se trouve aujourd'hui réduite à 1.4 équivalent temps-plein. La participation aux améliorations techniques d'HADES est aujourd'hui aussi restreinte : elle consiste en une contribution financière de 40 k€ pour la construction d'un détecteur de traces avec la technique des tubes-pailles qui augmentera l'acceptance aux angles avant. Cette réalisation sera faite par les collègues de Cracovie et l'IPNO construira seulement les cadres et supports mécaniques ; ce détecteur doit être prêt pour fin 2018.

L'expérience CBM étudie également la matière hadronique dense à température modérée. L'exploration du diagramme de phase de QCD a surtout été faite vers les hautes températures et les plasmas de quarks et gluons avec les expériences ALICE, ATLAS et CMS au LHC ou encore STAR et PHENIX à RHIC. Mais la matière nucléaire dans les conditions proches de celles des étoiles à neutrons suscite aujourd'hui un intérêt renouvelé, notamment suite à la

détection des ondes gravitationnelles produites par la fusion d'étoiles à neutrons. Ainsi, cet objectif est affiché par CBM à FAIR, NICA à JINR, NA61 et NA60++ au CERN ou encore Beam Energy Scan à RHIC. L'objectif est de déterminer l'équation d'état de la matière nucléaire dans ces conditions et d'étudier la restauration de la symétrie chirale et la production de formes exotiques. Le détecteur doit permettre de mesurer des états rares avec une grande précision statistique et de gérer un taux d'interactions allant jusqu'à 10 MHz avec une multiplicité de l'état final allant jusqu'à 600 particules. Ces contraintes constituent un défi pour le détecteur de vertex auquel contribue le groupe PICSEL de l'IPHC. Ce groupe, motivé par le défi technologique, est très impliqué dans la collaboration et conçoit actuellement une nouvelle génération de détecteurs CMOS dont les capacités de vitesse de lecture, de tenue aux radiations et d'épaisseur sont parfaitement adaptées. Le groupe, composé de 2 physiciens et d'une quinzaine d'ingénieurs, demande un investissement de l'IN2P3 de 210-240 k€ pour le développement et le test de différents prototypes de 2018 à 2021 pouvant déboucher sur la fabrication du détecteur de vertex.

Le programme PANDA a été conçu pour la spectroscopie hadronique avec la recherche de nouvelles formes de matière, états multi-quarks, boules de glue ou hybrides. C'est un programme très séduisant mais soumis à une grande concurrence avec LHCb et COMPASS au CERN, GLUOX à Jlab aux USA, BELLE au Japon et BES en Chine. Son atout est le faisceau d'antiprotons ; cependant la luminosité nécessaire ne sera disponible qu'avec la phase 2 de FAIR, soit autour de 2030. L'IPNO a eu une implication dans l'étude des facteurs de forme électromagnétiques et dans la R&D pour le calorimètre électromagnétique qui s'est arrêtée progressivement. Aujourd'hui le LAL propose son expertise pour concevoir un système de contrôle lent avec des moyens de l'ordre de 50 k€.

## **8.8. Prospectives**

### **Ions lourds**

Les activités françaises sur les ions lourds dans les trois expériences du LHC concernées sont scientifiquement pertinentes et complémentaires les unes des autres. Elles doivent être poursuivies et soutenues. Tous ces résultats sont nécessaires pour séparer les propriétés du plasma quarks-gluons des effets statistiques, hadroniques et nucléaires.

L'équipe LHCb ions lourds, relativement petite mais innovante et visible, doit continuer à participer aux prises de données et aux analyses des mesures obtenues sur cible fixe et en mode collision. Elle doit actuellement analyser puis publier les données du *run 2* qui s'achèvera en 2018. Selon les succès obtenus et l'impact scientifique attendu, la décision de, soit renforcer le groupe, soit réorienter ses activités, devra être prise d'ici trois ans typiquement. D'ici cette échéance, un soutien à l'équipe doit être garanti.

### **L'expérience ALICE**

Le potentiel de l'expérience pour mesurer et identifier les particules mais aussi pour faire la physique à petites impulsions transverses est relativement unique et dédié à l'exploration de la physique des ions lourds.

Le programme actuel et envisagé par la collaboration ALICE est bien établi et les analyses des *runs* 1 et 2 ont apporté des résultats significatifs dans le domaine des ions lourds. Les *runs* 3 et 4 offriront la possibilité de poursuivre l'étude des propriétés du QGP avec comme objectifs de tenter de répondre aux questions non résolues avec dix fois plus de statistiques.

La stratégie prévue avec les mises à niveau des détecteurs pour les *runs* 3 et 4 est solide. Les implications des groupes IN2P3 sont majeures et offrent une visibilité dans la collaboration mettant en valeur les expertises des laboratoires impliqués dans le domaine des CMOS, de l'électronique frontale et des systèmes de lecture des données. Une partie de la R&D servira au-delà du projet ALICE. Les ressources sont adaptées.

Il est essentiel de poursuivre les activités engagées, de mener à bien celles envisagées et de garder le niveau existant d'implication dans l'analyse puisque ce niveau a permis d'alimenter significativement les contributions de physique présentes dans les plus importantes publications d'ALICE.

Concernant de futures mises à niveau des détecteurs d'ALICE, le projet d'ajout d'un double calorimètre électromagnétique et hadronique de très grande granularité couvrant un domaine limité à très grande pseudo-rapacité, capable de discriminer les photons directs des photons de décroissance  $\pi^0$ , pourrait être intéressant à examiner. Il en est de même pour les études menées pour le développement d'un détecteur Silicium de grande surface s'appuyant sur l'imagerie CMOS et la technologie de *stitching*. Un tel détecteur permettrait de réduire de façon significative le budget matériel d'un futur détecteur de vertex.

Par ailleurs, il faut regarder plus concrètement l'avenir au-delà d'ALICE, notamment d'examiner le potentiel d'autres options qui peuvent jouer un rôle important dans l'avenir de physique hadronique tel l'EIC.

Il faut considérer attentivement la question de l'interprétation des données. Dans le domaine des ions lourds ultra-relativistes, on a observé une évolution considérable au niveau de la qualité de données expérimentales. On mesure avec une grande précision une large gamme d'observables de plus en plus sophistiquées. En ce moment, les interprétations des données sont souvent réduites à peu d'observables simples, voire une seule, ce qui ne permet pas d'avoir une vue globale et quantitative. Il semble nécessaire qu'ALICE, comme expérience principale dans ce domaine, prenne l'initiative pour guider les efforts vers une approche systématique pour l'interprétation des données. À l'image de ce qui se fait en physique des particules (ATLAS) ou des rayons cosmiques de très haute énergie (AUGER), il faut mettre en place une plateforme qui contienne les générateurs d'événements, motiver les théoriciens pour participer, fournir des outils pour une analyse complète de l'ensemble des données, et ce en toute transparence.

### **Collisions d'ions lourds dans CMS**

La communauté de physique hadronique dans CMS, composée d'environ 50 personnes, est petite, ce qui facilite la visibilité de l'équipe et fait qu'il y a très peu de concurrence sur les analyses. De plus, dans les années à venir, les Américains vont progressivement diminuer leur implication en raison de leur investissement dans sPHENIX à RHIC, ce qui devrait offrir une visibilité accrue.

Néanmoins l'équipe a longtemps vécu sur les contrats de deux chercheurs permanents. On peut donc être inquiet pour l'avenir et penser que le programme présenté pour le *run* 3 est bien ambitieux par rapport aux forces actuellement en présence. Les contrats ERC et ANR ont permis le démarrage d'une nouvelle activité originale qui a tenu toutes ses promesses. La production scientifique est abondante, de grande qualité et fortement visible. Néanmoins, une poursuite de cette activité à long terme ne pourra pas se faire avec uniquement de tels contrats. L'heure est venue de prendre une décision concernant la pérennisation du groupe,

pérennisation qui impliquerait le renfort par un chercheur permanent supplémentaire, par mobilité ou par recrutement.

### **Collisions d'ions lourds dans LHCb**

Ce projet est une réussite, avec plusieurs publications et un nombre croissant de collaborateurs. Les données acquises sur la période 2015-2017 et le potentiel scientifique sont prometteurs ; le contexte devrait encore s'améliorer avec la mise à niveau du détecteur LHCb et les collisions Pb-Pb qui devraient avoir lieu à partir de 2021.

Cependant, le nombre de physiciens français impliqués dans le projet LHCb ions lourds devrait diminuer au cours des prochaines années. Les groupes sont majoritairement composés de post-doctorants avec des financements ERC et LabEx, donc incertains à l'avenir : la masse critique permettant une collaboration efficace risque de ne plus être atteinte. Les ressources requises restent modestes puisqu'aucune contribution instrumentale ne leur est demandée.

### **Physique hadronique à Jefferson Lab**

Le groupe JLab de l'IPNO a réalisé un travail de grande qualité et très diversifié auprès de cet accélérateur. L'ensemble du groupe est reconnu internationalement et propose des expériences très régulièrement. De plus, le groupe accumule la responsabilité de porte-parole d'expériences. Il a la maîtrise de l'extraction des GDP à partir des données collectées à JLab. Il est le seul groupe travaillant sur cette physique de l'IN2P3, un autre groupe se trouvant à l'IRFU.

Depuis une année, le groupe a dû faire face au fait que Michel Guidal a pris la direction du laboratoire. Il avait un rôle moteur, notamment dans toute la partie interprétation des GDPs. Le groupe risque de souffrir de son absence sur ce point précis mais souhaite garder une activité diversifiée avec des objectifs clairs à moyen terme (prise et analyse de données jusqu'au tour de 2024). De plus, ce départ diminue les capacités d'encadrements du groupe qui encadre un grand nombre de travaux doctoraux.

Il s'agit d'un groupe actif, mais de taille modeste, qui perd un de ses membres acceptant la responsabilité de la direction d'un des laboratoires de l'IN2P3, mérite sans doute un suivi particulier. Le renforcement de ce groupe est par ailleurs soutenu par le conseil scientifique du laboratoire. En effet, la physique hadronique est très présente à l'IPNO sous plusieurs aspects complémentaires et la structuration d'une future participation à l'EIC pourrait partir de cette communauté. Un véritable essor de la participation française à cette physique sur ce nouvel accélérateur qui compte déjà une très importante communauté internationale passera sûrement par un recrutement à relativement brève échéance d'un physicien permanent.

### **Physique hadronique à GSI/FAIR**

L'IPNO contribue depuis 15 ans à l'expérience HADES au GSI. Le groupe, qui s'est fortement réduit suite à des départs à la retraite, maintient néanmoins un haut niveau d'implication scientifique dans l'étude de la matière hadronique dense à température modérée. Ce programme a un avenir clair jusqu'en 2021, avant le démarrage de la phase 1 de FAIR. Ce groupe a une expertise reconnue dans l'étude des résonances baryoniques et leurs décroissances électromagnétiques dans les canaux des paires  $e^+e^-$ . Elle propose par ailleurs une participation modeste aux améliorations techniques du détecteur en collaboration avec Cracovie.

En principe, l'implication dans HADES pourrait être un pont naturel vers PANDA ou CBM. Le conseil scientifique de l'IPNO a apporté des recommandations uniquement pour HADES, sans visibilité sur CBM ou PANDA.

Par ailleurs, l'IPHC souhaite contribuer à la conception et la réalisation de détecteurs de vertex CMOS adaptés aux collisions d'ions lourds : CBM-MVD, utilisant ainsi son expertise et préparant également l'ILC. Une implication des équipes du LAL dans PANDA est également proposée : elle consiste à relancer une participation purement technique suite à l'expertise acquise sur LHCb.

L'impact scientifique est très satisfaisant dans HADES au regard de la taille de l'équipe. Cependant, un impact scientifique suffisant sur trois instruments HADES, CBM et PANDA n'est pas concevable actuellement étant données les forces en présence.

La France est largement impliquée financièrement dans l'installation FAIR, le programme scientifique de FAIR est pertinent et enfin les détecteurs seront pleinement opérationnels quand les expériences ALICE, CMS et LHCb auront déjà profité des faisceaux à haute luminosité. Pour toutes ces raisons, il est essentiel de conserver la possibilité de contribuer significativement aux expériences de ces installations. L'équipe de l'IPNO, qui est très bien intégrée et active dans cette communauté, est le point d'entrée naturel et nécessaire pour de futurs collaborateurs. Le conseil soutient donc la pérennisation de ce groupe, ce qui passe par un recrutement à relativement brève échéance.

La contribution du LAL sur PANDA est purement technique et semble peu motivée scientifiquement. On peut la voir comme un éventuel soutien du LAL à l'IPNO pour consolider une participation future. La contribution sur le détecteur de vertex de CBM est importante, et sans être associée à une contribution scientifique, permet une visibilité de l'IN2P3 liée à l'expertise accumulée au cours des années à l'IPHC.

## 9. La physique des neutrinos

### 9.1. Contexte expérimental et théorique

Parmi les particules élémentaires, les neutrinos sont les seuls fermions à n'être sensibles qu'à l'interaction faible (en plus de la gravitation) et leur section efficace d'interaction est extrêmement petite. Cette particularité rend leur détection particulièrement difficile mais leur permet aussi de jouer un rôle unique dans le domaine de l'astronomie multi-messagers car ils peuvent parcourir de très grandes distances sans interagir ni être déviés ou s'extraire d'objets très compacts. Ils s'avèrent donc précieux pour étudier les sources du rayonnement cosmique ou l'explosion des supernovae notamment. Mais les neutrinos sont avant tout intéressants pour leurs propriétés fondamentales, en lien avec la théorie qui gouverne les particules élémentaires et leurs interactions. En effet, la valeur non nulle de leur masse déduite de l'observation de leur oscillation est l'un des écueils du modèle standard de la physique des particules, avec la matière noire, l'énergie noire, l'asymétrie matière-antimatière et l'inflation primordiale. Le fait que les neutrinos soient électriquement neutres (ou plus exactement qu'ils ne portent aucun nombre quantique additif conservé) leur permet, au moins en principe, d'être leurs propres antiparticules, c'est-à-dire d'être des fermions de Majorana avec un nombre leptonique violé. S'il y a violation du nombre leptonique à une échelle d'énergie très élevée, alors les masses des neutrinos seraient liées à une nouvelle physique à l'échelle d'unification des couplages de jauge. Celle-ci pourrait également être à l'origine de

l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers via le mécanisme de leptogénèse. Cette possibilité est suggérée par certaines théories de Grande Unification qui contiennent des neutrinos de Majorana superlourds qui engendrent des petites masses de Majorana pour les neutrinos du modèle standard. Si leurs couplages aux leptons violent la symétrie CP, ces neutrinos superlourds créent en se désintégrant une asymétrie entre le nombre de leptons et d'antileptons : l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers pourrait en être la conséquence.

Du côté expérimental la physique des neutrinos a connu des avancées remarquables depuis une vingtaine d'années. Les oscillations ont été mises en évidence avec diverses sources - neutrinos atmosphériques, neutrinos produits par le Soleil, des accélérateurs de particules ou des réacteurs nucléaires - et avec diverses techniques. Les canaux d'oscillation  $\nu_e \rightarrow \nu_e$  et  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  pour la disparition,  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  et  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  pour l'apparition ont été observés avec des sources artificielles, et la dépendance en longueur/énergie de la probabilité de survie a été mise en évidence par plusieurs expériences de disparition. Les différences de carrés de masse  $\Delta m^2_{21}$  et  $\Delta m^2_{31}$  et les angles de mélange  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$  et  $\theta_{13}$  des trois neutrinos de saveur ont été mesurés avec une précision croissante au cours du temps confortant le cadre théorique basé sur la matrice de mélange MNSP à trois saveurs incluant des phases de violation CP. Tout récemment, des signes en faveur d'une éventuelle violation maximale de la symétrie CP dans les oscillations ont été observés par l'expérience sur faisceau T2K et sont actuellement recherchés par l'expérience Nova.

Malgré le succès de cette description théorique, deux phénomènes observés de façon récurrente par les expériences neutrinos auprès des réacteurs ne peuvent être expliqués par le phénomène d'oscillation ; ils sont connus sous le nom d'anomalie des neutrinos de réacteurs (RAA ou Reactor Antineutrino Anomaly). La première anomalie consiste en un déficit moyen de 6,5% du flux d'antineutrinos électroniques attendus à proximité d'un réacteur. À ce déficit s'ajoute une distorsion, observée notamment par les détecteurs de Double Chooz, Daya Bay et RENO, dans le spectre en énergie des neutrinos mesuré avec un excès d'évènements autour de 5 MeV. Le déficit pourrait s'expliquer par une sous-estimation du flux d'antineutrinos électroniques émis par les réacteurs ou par l'existence d'un nouvel état du neutrino, appelé neutrino stérile de masse de l'ordre de l'électron-volt. Un neutrino stérile n'interagit pas avec la matière par interaction faible mais participe comme les autres neutrinos aux oscillations, ce qui pourrait expliquer un déficit par la transformation des antineutrinos électroniques attendus en antineutrinos stériles.

Ainsi, malgré les progrès notables en physique des neutrinos, de nombreuses questions fondamentales restent ouvertes. Les expériences en cours ou en préparation visent à répondre aux questions suivantes :

- les neutrinos sont-ils des fermions de Dirac ou de Majorana ?
- la symétrie CP est-elle violée dans le secteur des leptons ?
- l'ordre des masses des neutrinos est-il normal ou inverse ?
- quelle est l'échelle de masse absolue des neutrinos ?
- à quel octant appartient l'angle  $\theta_{23}$  ? Est-il maximal ?
- combien d'espèces de neutrinos actifs et stériles existe-t-il ?
- existe-t-il des interactions non-standard des neutrinos susceptibles d'affecter leurs oscillations et le rôle qu'ils jouent en astrophysique et en cosmologie ?

Des réponses à ces questions permettraient d'apporter un éclairage nouveau à des problèmes tels que l'origine des masses des neutrinos ou l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers.

Cela justifie le programme expérimental dans lequel les laboratoires de l'IN2P3 se sont fortement impliqués depuis déjà de nombreuses années et pour lequel l'expertise et le choix des projets est cohérent avec l'effort mondial et la feuille de route internationale de la physique des neutrinos. Ainsi les laboratoires français contribuent aux expériences réacteurs pour les paramètres des neutrinos avec Double Chooz et JUNO, aux expériences sur faisceaux avec les projets T2K, DUNE pour la recherche de la violation CP dans le secteur leptonique et dans les expériences courtes distances sur réacteurs pour la recherche de neutrino stériles de faible masse avec STEREO et Solid.

**L'expérience JUNO** est un gigantesque détecteur de neutrinos avec un scintillateur liquide situé à une profondeur de 700 m dans le sud de la Chine. La prise de données devrait commencer fin 2021 selon le calendrier officiel et devrait durer plusieurs années. JUNO recherchera :

- les oscillations de neutrinos en utilisant les neutrinos produits par réacteur avec une ligne de base de longueur moyenne, soit 53 km. Le principal objectif est de résoudre l'ambiguïté sur la hiérarchie de masse avec une signification qui devrait atteindre  $4\sigma$ . La violation de CP ne pourra pas être étudiée, mais la précision sur la plupart des autres paramètres d'oscillations tels que les angles de mixage et les différences de masse devraient être significativement améliorée ;
- les neutrinos astrophysiques qui proviennent du Soleil ou des supernovae, les neutrinos atmosphériques, les neutrinos produits dans la Terre ;
- la désintégration du proton.

La détermination de la hiérarchie de masse est très délicate car elle est basée sur la mesure d'un effet subtil d'interférence qui requiert une résolution en énergie du neutrino meilleure que 3% à 1 MeV. Les autres projets, encore en développement, qui ont pour objectif de résoudre la hiérarchie de masse à une échelle de temps similaire à celle de JUNO sont ORCA et PINGU par la mesure des oscillations des neutrinos atmosphériques et de leur interaction avec la matière. Les expériences accélérateurs Nova et T2K-II grâce à leur combinaison peuvent elles aussi apporter des informations sur la détermination de la hiérarchie de masse. JUNO sera le plus grand et le plus sensible des détecteurs à scintillateur liquide pour de nombreuses années.

**L'expérience DUNE** s'inscrit dans l'exploitation de faisceaux de neutrinos produits par accélérateur et dans des mesures dites de longue distance comprenant des détecteurs proches de la source de neutrinos et des détecteurs très éloignés. Le premier volet du projet DUNE se base sur l'utilisation de faisceaux intenses de protons fournis par une amélioration des installations de Fermilab. Le second volet est la mise en œuvre d'une nouvelle génération de TPC de très grand volume d'argon liquide comme milieu actif de détection selon deux approches technologiques : simple phase et double phase. Un troisième volet est le traitement, le stockage et l'analyse des données, à la fois celles simulées et celles produites par les détecteurs. Le projet a plusieurs objectifs scientifiques :

- réaliser une mesure de précision des oscillations de neutrino  $\nu_\mu$  et anti- $\nu_\mu$  sur une longue distance afin de déterminer la phase  $\delta$ -CP où une valeur différente de 0 ou  $\pi$  serait la première manifestation de violation de CP dans le secteur leptonique ;
- déterminer la hiérarchie de masse des neutrinos ;
- mesurer l'angle de mélange  $\Theta_{23}$  ;
- rechercher la décroissance du proton ;

- mesurer le flux de  $\nu_e$  produits par les supernovae dans notre Galaxie.

Le développement d'une TPC à argon liquide de 10 000 tonnes dite « dual phase » ou double phase, c'est-à-dire comprenant une phase liquide de détection et une phase gazeuse servant à amplifier le signal est l'une des réalisations techniques principales dans laquelle les laboratoires IN2P3 se sont impliqués. Le projet de TPC argon liquide double phase en développement pour DUNE est l'aboutissement d'une très longue phase de R&D qui a débuté en 2008 dans le cadre des programmes LAGUNA et LAGUNA-LBNO. L'IN2P3 contribue de manière significative à la construction d'un prototype 6x6x6 m<sup>3</sup> dans l'aire expérimentale nord du CERN sous l'appellation NP02 ProtoDUNE-DP issu du projet WA105. Les défis techniques sont la construction du plan de collection de charges dont les contraintes mécaniques, en milieu cryogénique, sont importantes. Le second défi est la collection de charges et de lumière en utilisant des ASIC en milieu cryogénique ainsi que la digitalisation et la synchronisation d'un nombre important de voies électroniques. Le troisième défi porte sur la gestion des données de simulation et d'expérience. La mise à niveau du faisceau de protons du Fermilab est nécessaire, impliquant là aussi plusieurs laboratoires français.

**L'expérience T2K** est une expérience d'oscillations des neutrinos de type faisceau longue distance située au Japon ; elle a été conçue pour étudier et mesurer précisément les oscillations neutrinos se produisant entre le complexe d'accélérateur J-PARC et le détecteur Super-Kamiokande (SK) situé à 295 km de la source de neutrinos. L'objectif est d'étudier la transformation des neutrinos muoniques du faisceau en neutrinos électroniques, ainsi que la même transformation avec des antineutrinos.

Un ensemble de détecteurs proches a été installé à 280 m de la source de neutrinos avec une contribution importante des laboratoires de l'IN2P3. Il s'agit du détecteur INGRID dans l'axe du faisceau, essentiel pour contrôler la direction du faisceau, et le détecteur hors-axe ND280 qui permet d'étudier avec précision la composition du faisceau avant oscillation et de déterminer les sources possibles de bruit de fond. Le détecteur Cherenkov à eau SK est utilisé comme détecteur lointain.

T2K a commencé ses prises de données en 2010. Après avoir obtenu en 2011 les premières indications de l'existence de la transition  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  et d'une valeur non nulle de l'angle de mélange  $\theta_{13}$ , T2K a définitivement prouvé l'apparition de  $\nu_e$  par oscillation en 2013 avec une signification statistique supérieure à  $7\sigma$ . Des équipes de l'IN2P3 ont été fortement impliqués dans l'opération, les étalonnages et l'analyse des données de T2K. Les contributions principales ont été INGRID, WAGASCI, ND280, l'analyse des oscillations et la participation active à l'expérience de production d'hadrons NA61/SHINE en vue de réduire les erreurs systématiques sur la connaissance des flux de neutrinos du faisceau.

**L'expérience STEREO** se situe à 10,3 m du cœur du réacteur de recherche de l'Institut Laue Langevin (ILL) de Grenoble qui est une source d'antineutrinos. Ce réacteur n'utilise presque un seul isotope de l'uranium, <sup>235</sup>U, contrairement aux réacteurs commerciaux. Cette caractéristique est importante pour diminuer les erreurs systématiques associées à l'évolution du combustible. L'objectif de STEREO est de tester les deux hypothèses permettant d'expliquer les deux phénomènes observés de façon récurrente par les expériences neutrinos auprès des réacteurs et appelés RAA : une sous-estimation du flux d'antineutrinos électroniques émis par le réacteur ou l'existence d'un nouvel état du neutrino, le neutrino stérile avec une masse de l'ordre de l'eV.

Le détecteur STEREO se compose de 6 segments de liquide scintillant dopé au Gadolinium sur 2,4 m de long permettant de tester la gamme des longueurs d'oscillation favorisée par les mesures existantes. La détection des antineutrinos se fait par une réaction de désintégration  $\beta$  inverse induite par l'interaction d'un antineutrino sur un proton du scintillateur. La signature de l'interaction se fait par la détection en temps de deux dépôts d'énergie correspondant au positron et au neutron émis. La reconstruction de signal se fait à une seule dimension.

Depuis 2016, lorsque le réacteur fonctionne à sa pleine puissance, environ 400 neutrinos sont détectés chaque jour. Un blindage important limite le bruit de fond présent dans le détecteur. Les premiers résultats basés sur 66 jours de mesures à pleine puissance du réacteur réduisent fortement l'espace des paramètres possibles pour un neutrino stérile : ils excluent avec un niveau de confiance de 98,8% le meilleur ajustement aux données précédentes cité plus haut.

**L'expérience SoLiD** est, comme STEREO, une expérience neutrinos auprès d'un réacteur proposée pour contribuer à la clarification d'un ensemble d'anomalies (RAA, gallium, LSND/MiniBooNE) qui, potentiellement, pourrait indiquer l'existence d'un neutrino stérile avec une masse autour de 1 eV et un couplage assez fort avec les autres neutrinos. Ainsi, le détecteur SoLiD est placé près du cœur en  $^{235}\text{U}$  pur à 95% du réacteur de recherche BR2 en Belgique au SCK-CEN. Il permet de couvrir une distance comprise entre 6 et 9 m.

Le principe de détection de SoLiD, tout comme STEREO, est basé sur la décroissance inverse-bêta. L'utilisation de détecteurs cubiques à scintillation en plastique solide de type PVT permet la lecture d'un signal lumineux à 3 dimensions. De plus, les cubes de scintillateurs sont partiellement en contact avec des écrans faits de scintillateur  $^6\text{LiF:ZnS(Ag)}$  afin de mettre en évidence la capture de neutrons retardés. Après l'installation et les tests, l'expérience a commencé sa prise de données en février 2018.

## 9.2. Prospectives

Depuis les années 90, l'IN2P3 a participé et développé son expertise avec des projets de neutrinos sur les réacteurs de l'LL, du Bugey avec les expériences Chooz, Double Chooz, Stereo, SoLid et JUNO et des projets de neutrinos sur faisceaux avec les expériences Nomad, CNGS/OPERA, K2K, T2K et DUNE.

Malgré les avancées majeures des 20 dernières années, il reste de nombreux points à éclaircir et à trouver des réponses à un certain nombre des questions fondamentales. De plus le formalisme à trois saveurs de neutrino ne satisfait pas toutes les observations. La « masse du neutrino » est l'un des très rares phénomènes observés qui soit un signe de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard de la physique des particules. Sa phénoménologie doit donc être explorée avec le plus de précision possible et la connaissance détaillée des propriétés de neutrinos nécessite:

- une plus grande précision dans les mesures, ce qui implique une meilleure maîtrise des effets systématiques et des prédictions précises par la théorie ;
- des sources plus intenses, ce qui implique des progrès au niveau du faisceau et des développements technologiques ;
- des détecteurs plus grands, ce qui est associée à une évolution vers des collaborations de plus en plus grandes
- une amélioration de la maîtrise des conditions expérimentales, que ce soit au niveau des sources de bruits de fond ou de l'environnement expérimental.

## La recherche de neutrinos stériles

Les Français jouent un rôle majeur et meneur dans les projets STEREO et SoLiD. Les points forts pour ces expériences résident dans l'expertise sur la physique de réacteurs, la maîtrise des technologies employées et l'exploitation des réacteurs de recherche situés en France et en Belgique. STEREO et SoLiD, devraient conclure dans les deux à trois prochaines années. Ces expériences devraient permettre de confirmer ou infirmer l'anomalie réacteurs.

L'expérience STEREO se poursuit avec une prise de données prévue jusqu'à la fin 2019. STEREO aura alors accumulé de l'ordre de 300 jours de données et espère fournir à la communauté une mesure de référence du spectre en énergie des antineutrinos électroniques associé à l'isotope  $^{235}\text{U}$ . De plus, la sensibilité atteinte devrait permettre de conclure sur la possibilité d'un neutrino stérile avec des caractéristiques permettant d'expliquer l'anomalie auprès des réacteurs.

Solid qui a commencé à prendre des données en 2018 prévoit de poursuivre sur une période de trois ans, donc jusqu'à début 2021 afin de collecter suffisamment de statistique et d'obtenir une mesure presque dominée par les erreurs systématiques. SoLiD espère être en mesure de rivaliser avec DANNS et NEOS et devrait fournir une détection et une analyse complémentaires de celles de l'expérience STEREO.

L'anomalie des réacteurs repose largement sur le spectre de  $^{235}\text{U}$  déterminé par Schreckenbach d'après des données des années 80. Au-delà de la vérification de l'excès autour de 5 MeV, l'objectif de mesurer le spectre en énergie des neutrinos par les collaborations STEREO et SoLiD afin de raffiner cette information de base et ainsi mieux cerner la RAA est essentiel pour progresser sur le cas scientifique du neutrino stérile.

## La hiérarchie de masse et la quête de la violation CP

Les expériences majeures qui fourniront des résultats sur ces deux volets et dans lesquelles les français sont fortement impliqués sont JUNO, T2K, T2K-II, DUNE ainsi que Orca avec les neutrinos atmosphériques et HK au Japon avec le faisceau de JPARC.

En ce qui concerne le problème de la hiérarchie de masse, les premières informations pourraient apparaître avec les expériences réacteurs (JUNO), accélérateurs (Nova, T2K-II) et atmosphériques (Orca) d'ici 10 ans. Elle devrait être complètement déterminée avec des faisceaux longue distance comme DUNE et HK d'ici 15 ans.

La valeur relativement grande de  $\theta_{13}$  a ouvert la possibilité de chercher à observer la violation de CP dans le secteur des leptons en utilisant des faisceaux de  $\nu_{\mu}$  et anti- $\nu_{\mu}$  et en comparant les probabilités d'apparition de  $\nu_e$  et d'anti- $\nu_e$ . C'est ainsi que T2K a pu récemment exclure les valeurs de la phase  $\delta$  conservant CP à plus de  $2\sigma$  et a préféré une valeur de  $\delta$  de  $-\pi/2$ . C'est la même approche expérimentale qui sera poursuivie par DUNE aux Etats-Unis et HK au Japon avec des faisceaux de plus en plus intense.

Le programme de T2K va se poursuivre par étapes avec jusqu'en 2021 les performances actuelles pour atteindre  $7.8 \cdot 10^{21}$  protons-sur-cible (p.o.t.) puis à faire une amélioration de l'accélérateur pour atteindre 1.3 MW de puissance ainsi qu'une amélioration du détecteur proche ND280 pour permettre en 2026 d'accumuler  $2.10^{22}$  p.o.t. et d'exclure  $\delta_{\text{CP}}=0$  jusqu'à éventuellement  $3\sigma$ . Cette phase est appelée T2K-II. Au-delà de cette phase, le projet serait de construire un futur détecteur lointain Hyper-K (HK) dont le volume fiduciel serait 8 fois celui de SK pour observer une mesure de la violation de CP avec une signification pouvant dépasser  $5\sigma$  selon la valeur de  $\delta_{\text{CP}}$  dont les performances restent très proches de celles du projet DUNE.

En ce qui concerne la phase de violation CP, des indications sont attendues d'ici 2024 avec T2K-II et Nova. La mesure peut être relativement longue et nécessite des faisceaux intenses longues distances, avec DUNE et HK notamment, qui devraient démarrer en 2026 et 10 à 15 ans de prise de données seront nécessaires pour atteindre plus de  $5\sigma$  pour certaines valeurs d'angle dont  $3\pi/2$ .

On peut noter que l'un des objectifs scientifiques étant la détection d'explosion de supernova dans notre Galaxie, il est indispensable d'avoir des détecteurs en fonctionnement sur de très longues durées si on veut raisonnablement espérer une détection.

Concernant l'étude des paramètres de la matrice de mélange leptonique, les expériences sur accélérateurs (T2K, DUNE, HK) et réacteurs (JUNO) se complètent par rapport au secteur des oscillations étudiées. À l'instar d'ATLAS et CMS, ou LSST et Euclid, ces projets de grande envergure sont en synergie : les questions de physique sont de première importance, et le niveau requis de contrôle des effets systématiques est tel que des approches à la fois redondantes et complémentaires sont justifiées. L'expérience JUNO va apporter une précision unique sur les paramètres du secteur dit « solaire » alors que les expériences sur accélérateurs se destinent à déterminer la violation de CP et à contraindre plus fortement le secteur dit « atmosphérique ». Concernant la hiérarchie de masse ces projets devraient permettre de la déterminer mais avec des significations très différentes.

## **10. La matière noire et la double désintégration beta sans neutrino : La physique des événements rares**

### **10.1. Introduction**

La détection directe de matière noire et l'étude de la décroissance double beta sans neutrino ont comme point commun que les événements recherchés sont très rares. Puisqu'il n'y a pas de source artificielle dont on peut augmenter l'intensité, comme c'est le cas au LHC par exemple, il est indispensable de réduire le bruit de fond au maximum, lui aussi d'origine naturelle. La base est de s'affranchir au mieux du rayonnement cosmique. Ainsi, on étudie lors de ce conseil des expériences qui se protègent par des kilomètres de roche en s'installant dans des laboratoires souterrains.

L'existence d'une grande quantité de matière non baryonique (MN pour matière noire) est aujourd'hui fermement établie par un ensemble d'observations astrophysiques à l'échelle des galaxies, des amas de galaxie et de l'univers observable avec le rayonnement fossile. L'alternative que serait la gravité modifiée est rendue très difficile par l'ensemble des échelles à considérer simultanément ; de plus les modèles de type MOND (MODified Newtonian Dynamics) ont été exclus par la quasi-coïncidence du signal en ondes gravitationnelles et en ondes électro-magnétiques lors la fusion de deux étoiles à neutrons détectée par LIGO-Virgo. Cette MN serait composée de particules (éventuellement considérées comme des ondes, selon leur masse). Ces particules interagissent par gravité - d'où le terme "matière". Elles n'interagissent pas par électromagnétisme - d'où le terme souvent jugé inapproprié de "noire". Elles doivent être non-relativistes à l'époque de l'émission du rayonnement fossile, 380 000 après le Big-Bang - d'où le terme parfois ajouté de froide. Il n'est pas impossible en revanche qu'elles soient sensibles à l'interaction faible. Mais dans tous les cas elles interagissent au plus très faiblement avec elles-mêmes et avec la matière baryonique. Ces particules doivent

être stables, ou au moins avec une durée de vie supérieure à l'âge de l'univers, soit 13.8 milliards d'années. Les théoriciens peuvent, avec ces arguments, "contraindre" la masse de ces particules dans une gamme de 90 ordres de grandeur. Ce qui laisse de nombreuses possibilités ...

Parallèlement, la physique des particules tente de perfectionner son modèle Standard. L'une des voies qui semblait particulièrement prometteuse est la Supersymétrie. Cette théorie, aux nombreux paramètres libres, prédit notamment l'existence d'une nouvelle particule stable qui pourrait avoir toutes les bonnes propriétés en termes de masse, section efficace et abondance pour être la particule de matière noire. Ces particules de MN devraient interagir avec la matière d'un détecteur par interaction faible. Il est donc naturel d'essayer d'observer ces particules génériquement appelées WIMPs (Weakly interactive massive particles) par diffusion sur des cibles et de nombreux projets ont vu le jour de par le monde pour traquer cette matière noire. Si la base théorique de l'apparition de nouvelle physique à l'échelle du TeV peut être remise en cause avec les résultats du LHC, l'évolution thermique de l'Univers reste une motivation forte pour les WIMPs puisque des particules ont, naturellement, l'abondance nécessaire.

Jusqu'à présent, aucun signe conclusif de présence de WIMPs n'a été mis en évidence. Un débat entoure toujours l'unique signal positif, aujourd'hui très significatif, basé sur la modulation annuelle détecté par l'expérience DAMA au Gran Sasso mais correspondant à un espace des paramètres exclu par d'autres expériences.

Les limites actuelles ont éliminé de nombreux modèles, mais il en reste un nombre significatif, plus compliqués, qui s'accordent avec ces contraintes dans la gamme des masses au-dessus du GeV. Ce sujet est ainsi maintenant davantage guidé par l'expérience que la théorie, ce qui implique de disposer d'un large panel de techniques de détection. Dans ce vaste champ des masses à considérer, seuls les projets recherchant des WIMPs ont été présentés au conseil scientifique durant sa mandature.

La double décroissance beta correspond à une réaction vers un noyau petit-fils, donc avec la transformation de deux nucléons. Le temps de demi-vie pour les cas observés en ( $2\beta 2\nu$ ), concernant une trentaine d'isotopes, est de  $10^{18}$  à  $10^{24}$  années, ce qui en font bien des événements rares. C'est une réaction autorisée dans le cadre du MS si elle s'accompagne de l'émission de deux neutrinos. Ce conseil étudie la recherche de désintégration double beta sans émission de neutrinos ( $2\beta 0\nu$ ). Ce cas de violation du nombre leptonique de deux unités fait appel à de la nouvelle physique et le neutrino doit être de type Majorana, c'est-à-dire qu'il est sa propre anti-particule. La mesure de la demi-vie de cette décroissance serait sensible à la masse absolue des neutrinos, à la hiérarchie de masse et à la violation de CP.

Aucune décroissance de ce type n'a encore été détectée, la limite sur la demi-vie est de  $10^{26}$  années, ce qui correspond à 1 décroissance / an/ 100 kg d'isotope. Aucun isotope n'est parfait et chaque expérience fait un choix en fonction de sa technique expérimentale. L'objectif est d'atteindre des limites sur les demi-vies de  $10^{28}$  ans. Avec 10 tonnes d'isotope, en 10 ans, les diverses expériences attendront de 1 à 10 événements : il faut donc un bruit de fond proche de 0, ce qui implique une installation dans un site profond et vaste.

La collaboration EDELWEISS est née dans les années 1990, elle est l'une des expériences historiques, au niveau international, pour la recherche des WIMPs de masse supérieure à  $20 \text{ GeV}/c^2$ . Elle est basée sur des bolomètres cryogéniques massifs : les détecteurs font des

centaines de grammes chacun et sont refroidis à 18 mK. Ces détecteurs sont équipés d'un thermomètre en germanium dopé pour mesurer l'énergie totale déposée dans le cristal et des électrodes interdigitales mesurent l'ionisation afin de discriminer efficacement les reculs nucléaires - le signal attendu - des interactions leptoniques - une large part du bruit de fond. La très bonne efficacité de réjection atteinte par EDELWEISS a été la clé du succès pour les trois phases successives de l'expérience et a permis l'obtention de limites au-delà de  $20 \text{ GeV}/c^2$ . Depuis 2010 environ, les limites obtenues par les expériences bolométriques ont été dépassées dans cette gamme d'énergie par les détecteurs basés sur une large masse de xénon. L'expertise reconnue de la collaboration EDELWEISS n'est pas perdue puisque la collaboration s'est réorientée vers un programme de R&D pour cibler les WIMPs plus légers, d'une masse comprise entre 5 et  $20 \text{ GeV}/c^2$ .

L'expérience XENON a également pour objectif la détection directe de matière noire. Elle est basée sur un grand détecteur à xénon installé dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso en Italie. XENON est conçu pour détecter les WIMPs de notre halo galactique avec une masse comprise entre quelques  $\text{GeV}/c^2$  et  $1 \text{ TeV}/c^2$ . Grâce à la masse de la cible de plus d'une tonne, XENON est l'un des détecteurs de WIMPs les plus sensibles au monde. Le principal défi est la discrimination entre les reculs nucléaires qui seraient causés par les rares interactions entre MN et cible et les diverses sources de bruit de fond. Dans XENON, cet objectif est atteint en combinant la détection de la lumière de scintillation dans le xénon liquide avec les mesures d'ionisation utilisant la phase gazeuse du xénon. L'expérience XENON a commencé à prendre des données en 2007 avec 15 kg de xénon, initiant l'utilisation de cet élément pour la recherche de WIMPs. En 2016/2017, XENON1T, avec un total de 3.5 tonnes de xénon, a collecté des données. De fortes limites d'exclusion ont été établies avec des sections efficaces nucléon - matière noire indépendante du spin atteignant  $10^{-46} \text{ cm}^2$ . La prochaine version rebaptisée XENONnT, avec une masse de 8 tonnes de matière cible commencera à prendre des données en 2019, suivi par les 50 tonnes du détecteur suivant, DARWIN, en 2023. Avec ce dernier, la sensibilité devrait permettre d'atteindre des limites sur la section efficace de quelques  $10^{-49} \text{ cm}^2$ , ce qui correspond au plancher du bruit de fond irréductible des neutrinos astrophysiques.

L'expérience SuperNEMO se place dans la problématique de la physique du neutrino qui a connu des développements remarquables ces dernières années. Cette décroissance  $2\beta 0\nu$  pourrait aussi impliquer des extensions innovantes du modèle standard qui pourraient être reliées à l'asymétrie matière-antimatière. Les expériences NEMO sont originales par le fait que la source est découplée du détecteur ce qui permet une détection avec une mesure non seulement de l'énergie des électrons mais également de leurs trajectoires. Les autres expériences dites « calorimétriques » ne mesurent que l'énergie. SuperNEMO est l'héritier de NEMO-2 (1992-1998) et NEMO3 (2004-2011) qui ont obtenu des résultats remarquables grâce au faible bruit de fond, ce qui a permis non seulement de mettre des limites sur la demi-vie  $2\beta 0\nu$ , mais aussi de faire les mesures les plus précises de la décroissance  $2\beta 2\nu$  pour de nombreux isotopes intéressants. La stratégie de la collaboration SuperNEMO est de pousser cette technique au maximum pour améliorer encore sa capacité à identifier et réduire les bruits de fond tout en conservant la faculté de détecter et d'identifier formellement un « événement en or » signant un processus  $2\beta 0\nu$ . Un autre avantage de SuperNEMO est de pouvoir étudier plusieurs isotopes.

Le projet DAMIC a pour but de rechercher les reculs des noyaux et des électrons induits par les interactions avec les particules légères de matière noire à l'aide de dispositifs CCD maintenus à température cryogénique. Dans ce cadre d'énergie et de masse la détection directe

est plus efficace via la diffusion sur les électrons que sur les noyaux. Les expériences actuelles ont une sensibilité limitée à ces interactions MN-électron car il est nécessaire de mesurer les charges individuelles et d'avoir un courant de fuite particulièrement faible. DAMIC utilise des CCDs massifs, avec une résolution spatiale 2D très élevée, une sensibilité aux électrons uniques dans le dispositif de silicium et un courant de fuite extrêmement faible. Ce seuil en-dessous du keV et la capacité de détection d'un électron unique sur le détecteur le rendent particulièrement sensible aux faibles masses de WIMP ( $<10$  GeV) et au secteur caché ( $\ll$  GeV). Le prototype a permis de montrer le potentiel et les performances avec succès. Le projet DAMIC-M vise à installer un détecteur de 1 kg au laboratoire souterrain de Modane (LSM) d'ici 2020 pour une exposition de 1 kg.an avec la possibilité d'atteindre la sensibilité visée au secteur caché de la MN en moins de trois ans.

Les premières mesures expérimentales de la diffusion cohérente de neutrinos sur les noyaux par la collaboration COHERENT en 2017 ont ouvert la porte à un programme nouveau et des possibilités d'études de processus au-delà du modèle standard qui impacteraient la distribution d'énergie du CENNS (*Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering*). Le CENNS peut être alors utilisé pour étudier diverses questions relatives au MS et au-delà telles que l'existence de neutrinos stériles, le moment magnétique des neutrinos ou encore les interactions non standard portées par de nouvelles particules. La collaboration RICOCHET a pour objectif de construire un observatoire CENNS. L'objectif principal est de développer un détecteur qui pourrait utiliser plusieurs cibles à l'échelle du kilogramme avec une réjection de fond jusqu'à environ 10 eV. Ce programme profite de synergies fortes avec EDELWEISS et SuperCDMS. Le choix du site de réacteurs pour CENNS n'est pas encore défini entre le site de Chooz en France ou aux Etats-Unis.

DarkSide (DS) est un projet de recherche directe de matière noire utilisant une TPC à argon liquide en double phase. La particularité de DarkSide est d'utiliser de l'argon extrait du sous-sol, et de ce fait non contaminé par l'argon cosmogénique afin de pouvoir réduire drastiquement ce bruit de fond. Le système double phase permet de profiter des deux composantes d'émission de lumière provenant des processus de scintillation dans le liquide et des processus d'ionisation dans le gaz pour reconstruire les topologies des événements et discriminer entre les signaux des reculs des électrons et des nucléons. Le développement de DarkSide suit des étapes correspondant à l'augmentation graduelle des masses mises en jeu pour simultanément valider les techniques et commencer à chercher des WIMPs de basse masse. Le prototype de 50 kg installé au laboratoire souterrain du Gran Sasso a permis de valider le concept, a confirmé le potentiel de la discrimination par la forme du signal pour séparer les bruits de fond et a permis aussi de démontrer les avantages liés à l'utilisation de l'argon souterrain. L'étape suivante va consister à élaborer un prototype de 1000 kg, qui fonctionnera d'abord au CERN avec de l'argon atmosphérique avant d'être installé au Gran Sasso en vue de fonctionner avec de l'argon souterrain d'ici 2020.

Le projet MIMAC a pour objectif l'observation directionnelle d'une collision élastique entre une particule de matière sombre et un noyau. L'observable est l'enregistrement d'une trace 3D d'un recul nucléaire permettant la corrélation de la direction de la trace avec l'orientation du détecteur dans le plan de la Galaxie. La technique est présentée comme unique. Le projet MIMAC est une TPC à basse pression (50 mbar) avec comme cible les noyaux de  $^{19}\text{F}$ ,  $^{12}\text{C}$ , H et  $^4\text{He}$ . La partie détection est basée sur un micromegas pixelisé, technologie maîtrisée par l'IRFU. Le projet a débuté en 2005 et est financé depuis 2007 par une ANR. Un premier prototype installé en 2012 au LSM a montré de bonnes performances. Une étude systématique de la fonction de réponse est réalisée en particulier par la mesure du facteur de *quenching*.

Une série de jalons du projet de développement est présentée. Une collaboration fructueuse avec le Laboratoire de Métrologie et Dosimétrie de Neutrons a été créée. Le futur de cette collaboration est la construction d'un détecteur de  $1 \text{ m}^3$ .

Le projet NEWS porte sur la mesure directe de l'interaction de particules neutres dans une TPC sphérique avec une seule voie de lecture. La spécificité de NEWS est la recherche de particules relativement légères, entre 0.1 et 1 GeV. NEWS partage avec R2D2 le même prototype de TPC sphérique appelé SEDINE installé au LSM. Le détecteur final NEWS-G aura un diamètre de 1.4 m et sera opéré à l'horizon 2020 à SNOLAB. Les défis sont le développement de détecteurs de basse activité, l'obtention d'un seuil de détection le plus bas possible, ainsi que l'étalonnage. Le projet R2D2 porte sur l'observation, au sein d'une TPC sphérique à haute pression, d'évènements de décroissance double beta sans neutrino. Les défis de ce projet sont le travail à haute pression (40 bars) et la résolution à atteindre. La stratégie à long terme n'est pas encore proposée dès lors que tout dépend de la résolution atteinte avec le présent prototype.

Il est nécessaire de baisser les limites actuelles de la masse effective des neutrinos pour contraindre la hiérarchie de masse. CROSS/CUPID est un projet de R&D pour la décroissance  $2\beta 0\nu$  par bolomètre à partir de nouveaux cristaux de haute résolution et basse activité. Le premier objectif est le développement de bolomètres basé sur un matériau scintillant candidat à la décroissance  $2\beta 0\nu$ . Le développement technologique est présenté étape par étape. Le second objectif est le développement d'un matériau alternatif pour les bolomètres. Dans ce cadre, la collaboration CUORE a mis en fonctionnement 1 tonne de bolomètres au sein du cryostat d'DELWEISS installé au Gran Sasso pour démontrer la validité de la technologie. Un démonstrateur de 10 kg est en cours d'assemblage. La prochaine étape est la construction du détecteur final où environ 250 kg de  $^{100}\text{Mo}$  doivent être « assemblés ». Le détecteur et sa technologie sont très prometteurs sur le long terme dans la recherche d'un signal  $2\beta 0\nu$ . Il pourra soit le découvrir, soit le confirmer, en mesurant sur un autre isotope (hors Ge ou Xe qui seront à la portée d'autres expériences) dans le cas où le neutrino est une particule de Majorana et si la hiérarchie des masses est inversée. La phase CUPID doit être consolidée pour le détecteur final.

## 10.2. Perspectives

On peut noter que les axions sont un candidat générique à la matière noire, également physiquement motivé, et ce depuis plusieurs dizaines d'années. L'un des piliers des WIMPs étant mis à mal par l'absence de signe de nouvelle physique dans les résultats du LHC, en parallèle de l'élargissement du domaine de paramètres du candidat de type WIMP, cette hypothèse doit être sérieusement envisagée. Il est souhaitable de considérer le problème de la matière noire de la façon la plus large possible, en examinant tous les candidats, toutes les approches expérimentales mais aussi les efforts des groupes de physique théorique.

Plusieurs équipes mettent en place des R&D sur des méthodes ou des techniques originales pour participer à la traque de la matière noire. Les financements sont essentiellement hors IN2P3, mais la liberté de choix et le temps dont disposent les chercheurs permanents permettent cette diversité, qui est une richesse. Parallèlement, il faut savoir arrêter une R&D, une approche expérimentale ou même un projet si une autre option s'avère plus prometteuse, ce qui est le cas pour SuperNEMO qui s'achève probablement après le démonstrateur ou EDELWEISS qui se réoriente. Ce sont des processus normaux, inévitables, dans un domaine aussi exploratoire.

Au vu du large spectre des prédictions théoriques sur la masse et la section efficace d'interaction avec la matière, il est impossible d'anticiper le premier signal de matière noire qui sera observé. Cela se traduit par un panorama très large d'expériences et de techniques. Un signal positif aura assurément un impact considérable. Pour acter la découverte définitive de la matière noire, il est vraisemblable que la détection avec une autre technique, avec la directionnalité par exemple, s'avèrera nécessaire.

Aujourd'hui, l'expérience avec la plus forte visibilité est XENON, avec un réel potentiel de découverte dans un avenir proche puisque les détecteurs, avec un volume permettant l'obtention de nouveaux résultats compétitifs, sont financés et en construction. Le projet DarkSide est basé sur une technologie différente, compétitive également, et se positionne également sur un réel potentiel de découverte.

Les autres projets sont des R&D ou des projets encore en phase de développement. Le potentiel est important, à terme, mais ces projets doivent encore valider la pertinence de leur approche expérimentale. Le retour attendu à court ou moyen terme est donc un retour d'expertise sur la viabilité des choix opérés.

Dans la recherche directe de matière noire, il faut trouver le bon équilibre entre soutenir les idées nouvelles, les initiatives et se donner les moyens de contribuer efficacement à la recherche de matière noire par détection directe dans le domaine de masse des WIMPs, aujourd'hui un peu élargi. Si la présence de nombreux projets illustre la dynamique du sujet, la convergence vers une technique prometteuse, complémentaire à celle de XENON, serait souhaitable pour concentrer les forces à moyen terme car la finesse de la connaissance de l'instrument et de son environnement qui est indispensable est telle que seule une équipe raisonnablement large et pleinement investie peut faire face.

Dans le domaine de recherche de désintégration de type  $2\beta 0\nu$ , la situation est aujourd'hui moins claire qu'il y a quelques années. À terme, l'objectif est de décider quelle technologie choisir, la porter si besoin pour la transformer en infrastructure de recherche. Aujourd'hui la situation n'est pas mûre pour cette décision. La R&D est donc à maintenir pour permettre un choix éclairé ultérieurement.

Les activités de R&D sur financement ANR et ERC sont, par essence, d'assez courte durée. Toutefois certains projets tel MIMAC se développent sur de longues périodes avec l'enchaînement de divers financements. Il faut se demander si un tel modèle est soutenable à long terme. Les projets « Matière noire » organisés autour de collaborations internationales bien établies (XENON mais aussi DarkSide ou EDELWEISS par exemple) se développent sur de longues périodes avec un processus incrémental. Cette longévité peut correspondre aussi à des évolutions en terme de domaine d'énergie : ainsi l'expertise acquise est "recyclée", ce qui est une richesse dans un domaine où, aujourd'hui, c'est l'expérience qui guide les théoriciens et non plus le contraire. Par ailleurs, des développements instrumentaux originaux requis par ce sujet conduisent à des projets de valorisation prometteurs, ce qui est bénéfique pour l'institut et la société.

En ce qui concerne XENONnT et DARWIN, le projet est solide, avec un objectif précis : atteindre le « plancher neutrinos ». S'il est atteint, il faudra changer sans doute de stratégie, mais des conditions très contraignantes auront été posées. Pour XENON, étant donné que c'est l'une des expériences phare de la discipline, elle devrait accréter des ressources

humaines supplémentaires pour avoir un poids suffisant, et sur le long terme, dans une collaboration internationale de taille importante.

La R&D sur les basses masses d'EDELWEISS et la R&D de RICOCHET sont initiées par la même équipe. Il faut attendre quelques années pour avoir les résultats des deux approches avant d'avoir un avis sur leur pérennité.

Enfin, pour SuperNEMO, la collaboration est en train de démarrer le détecteur. Après exploitation de ce prototype, le constat sera probablement que la technique n'est pas viable à grande échelle et que les avantages de la technique de suivi des traces ne sont pas suffisants pour compenser la faible masse de la cible. L'équipe ne prévoit a priori pas de la poursuivre car la solution mise en place risque de ne pas s'avérer suffisamment efficace par rapport aux concurrents - ce qui naturellement n'était pas prévisible au démarrage du projet.

## **11. Conclusion**

Les recherches menées au sein de l'IN2P3 couvrent un spectre extrêmement large et diversifié. Elles couvrent la physique nucléaire, la physique des particules et des astroparticules, la radiochimie, la physique hadronique, mais aussi des expériences concernant les propriétés de certaines particules spécifiques (telles que le neutrino). Des recherches sont aussi menées pour dévoiler la nature de la matière noire et de l'énergie noire. A ces disciplines s'ajoutent les développements techniques de grande envergure tels que les développements de nouveaux concepts d'accélération de particules ou de détecteurs de nouvelle génération. Finalement l'application des outils développés dans ces disciplines considérées plutôt comme « fondamentaux » a créé de nouvelles activités, par exemple à l'interface de la physique nucléaire et de la santé, dans le cadre de l'énergie nucléaire ou au niveau d'autres enjeux sociétaux.

A ces sujets expérimentaux s'ajoutent des travaux théoriques menés souvent en concert avec les expérimentateurs. Cette interaction expérience - théorie est une richesse inestimable pour nos disciplines et la meilleure façon pour approfondir nos connaissances.

Il serait illusoire de proposer des perspectives pour un spectre aussi vaste. Le Conseil scientifique de l'IN2P3 s'est ainsi limité à proposer et à dégager des perspectives dans les champs d'activité qu'il a examinés et évalués au cours de son mandat de 4 ans. Ce rapport de prospective est ainsi loin d'être complet, mais peut néanmoins servir de guide pour l'avenir des domaines majeurs de recherche à l'Institut.