



**CSI  
IN2P3**

**2023**

# **RAPPORT DE PROSPECTIVE**

**CONSEIL SCIENTIFIQUE D'INSTITUT**

Comité national de la recherche  
scientifique



# CSI IN2P3 INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

Olivier DRAPIER (président); Nicolas CHANON (secrétaire scientifique); Luisa ARRABITO; Gustaaf BROOIJMANS; Heide COSTANTINI; Brigitte CROS; Stéphanie ESCOFFIER; Beatriz FERNANDEZ DOMINGUEZ; Sophie HENROT-VERSILLE; Patrick JANOT; Didier LAPORTE; Mats LINDROOS; Frédérique MARION; Rémi MAURICE; Claudia NONES; Béatrice RAMSTEIN; Marc ROUSSEAU; Christopher SMITH; Régine TREBOSSEN; Guseppe VERDE; Mahfoud YAMOUNI; Frédéric YERMIA.

Membres partis à la retraite pendant la durée de la mandature : Louis FAYARD, Valérie GIVAUDAN, Nadine NEYROUD.

## Résumé

Ce document est le rapport de prospective de la mandature 2019-2023 du Conseil scientifique de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS. Il se veut complémentaire à l'exercice de prospective nationale réalisé par l'institut publié fin 2022, auquel le Conseil a été associé. Dans cet esprit, après un rappel des missions de l'institut et du fonctionnement du Conseil, il propose les principaux développements scientifiques et sujets transverses qu'il nous semble important d'examiner dans les quelques années qui viennent.

---

## Introduction

---

Le présent document est le rapport de prospective du Conseil scientifique de l'IN2P3 (l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules). L'IN2P3 a organisé à partir de 2020 un exercice de prospective consistant en un appel à contributions et une série de séminaires thématiques organisés en treize groupes de travail. Plusieurs fois différé pendant la pandémie de Covid-19, un colloque de restitution a été tenu en octobre 2021. L'ensemble des documents résultant de cet exercice de prospective se trouve à l'adresse suivante :

<https://prospectives2021.in2p3.fr/> .

Le Conseil scientifique d'institut (CSI) de l'IN2P3 a été associé à cette démarche de prospective nationale, notamment avec un membre qui le représentait dans chacun des treize groupes de travail. Le rapport final a été publié en décembre 2022, qui présente les priorités nationales de l'institut en physique nucléaire, des particules et des astroparticules à l'horizon 2030. Il a été transmis aux universités et organismes de recherche, ainsi qu'au ministère de tutelle. Ce rapport de synthèse est disponible à l'adresse suivante :

[https://prospectives2020.in2p3.fr/wp-content/uploads/2023/01/FrenchRoadmap2030\\_NuclearParticleAstroparticlePhysics.pdf](https://prospectives2020.in2p3.fr/wp-content/uploads/2023/01/FrenchRoadmap2030_NuclearParticleAstroparticlePhysics.pdf) .

Les conclusions de ce rapport ne sont évidemment pas reproduites dans le présent document. L'essentiel du travail de prospective scientifique ayant été conduit récemment lors de ce processus, le présent rapport adopte un angle légèrement différent, qui se veut complémentaire. Il s'appuie naturellement sur les travaux et les comptes rendus des sessions du Conseil, dont une liste se trouve en annexe 3.

Dans une première partie, nous rappelons les missions de l'IN2P3 et les principaux axes des recherches menées par les équipes de l'institut. Vient ensuite une partie consacrée au fonctionnement du Conseil durant ces cinq dernières années.

Ensuite, pour chaque thématique de recherche, le présent document rappelle les principaux projets examinés lors des sessions du Conseil. Un second chapitre expose les thèmes récurrents qui n'ont pas pu être examinés par notre mandature, et qui devront sans doute être abordés par le Conseil dans un futur proche. Viennent ensuite des projets partiellement examinés ces cinq dernières années, mais dont le Conseil a préconisé qu'ils soient suivis et examinés à nouveau lors de la prochaine mandature. Enfin, sont exposés un certain nombre de sujets émergents ou qui n'ont pas été abordés durant les années précédentes, pour lesquels il nous semble que la participation de l'institut devra être organisée rapidement le cas échéant afin de garantir une visibilité appropriée et un retour scientifique fort.

---

## I. Les missions de l'IN2P3

---

L'IN2P3 a pour mission de promouvoir et fédérer les activités de recherche dans les domaines de la physique nucléaire, des particules et des astroparticules. Il coordonne les programmes dans ces domaines pour le compte du CNRS et des universités, en partenariat avec le CEA. L'IN2P3 conduit ses recherches dans trois domaines scientifiques principaux :

- La physique des particules et des interactions fondamentales, qui étudie les composants les plus élémentaires de la matière et leurs interactions ;
- La physique et l'astrophysique nucléaire, qui étudie la structure du noyau atomique et les réactions nucléaires, ainsi que leurs implications dans des applications sur Terre ou dans le cycle de vie des étoiles ;
- La physique des astroparticules et la cosmologie, qui décrit l'évolution de l'Univers et l'observe au moyen d'expériences qui en détectent les différents messagers (particules, rayonnements, ondes gravitationnelles).

Il conduit pour cela des recherches dans trois domaines technologiques d'intérêt :

- Les accélérateurs de particules, qui permettent de réaliser des collisions de particules fondamentales ou de noyaux,
- Les détecteurs de particules, qui enregistrent les résultats des collisions de particules (cosmiques ou artificiellement accélérées),
- Les moyens de calcul et de stockage de données, ainsi que les algorithmes qui permettent d'analyser les événements observés.

Il mène également des projets de recherche interdisciplinaires sur les sujets suivants :

- filières et techniques innovantes de production d'énergie nucléaire
- techniques nucléaires innovantes pour la santé
- radionucléides dans l'environnement
- synthèse de noyaux et de matière organique dans l'Univers
- techniques nouvelles d'imagerie de la Terre et pour l'archéologie

Ces activités sont regroupées en cinq grands thèmes, chacun sous la responsabilité d'une directrice adjointe ou d'un directeur adjoint scientifique. Ces différents domaines sont brièvement décrits au paragraphe suivant.

---

## II. Thèmes de recherche à l'IN2P3

---

### A. Physique des particules et physique hadronique

La physique des particules concerne l'étude du modèle standard des constituants de la matière et de leurs interactions fondamentales. Nous savons aujourd'hui que ce modèle est incomplet, à plusieurs titres, dont le fait qu'il ne rend compte que d'une très faible partie du contenu de l'Univers (environ 5%), puisqu'il ne comporte à ce jour aucun élément qui permette de comprendre ce que sont la matière sombre (environ 27%) et l'énergie noire (environ 68%). De plus, la découverte du boson de Higgs en 2012 et la mesure de sa masse ouvrent des questions sur la stabilité du vide et la nature profonde de la brisure de symétrie électrofaible, qui pourraient impliquer l'existence de particules encore inconnues. La recherche expérimentale de nouvelles particules s'organise autour de deux piliers.

Le premier, habituellement qualifié de « frontière en intensité », consiste en des mesures de haute précision, des recherches d'événements rares, et des recherches de phénomènes au-delà du modèle standard à très faible section efficace, généralement à l'aide de collisions de leptons qui bénéficient d'un environnement expérimental avantageux. La comparaison des mesures de précision avec les calculs théoriques d'une précision comparable est sensible aux effets quantiques d'éventuelles nouvelles particules bien plus lourdes que la limite cinématique du collisionneur à leptons. Typiquement, une amélioration de la précision de mesure par un facteur 100 permet d'étendre l'échelle de masse explorée d'un facteur 10.

L'autre pilier, connu sous le nom de « frontière en énergie », vise à explorer l'échelle de masse en question avec des collisionneurs de hadrons, en tentant de produire directement ces nouvelles particules. Les hadrons sont en effet des particules plus lourdes, donc plus faciles à accélérer à haute énergie car elles émettent moins de rayonnement synchrotron, mais elles ne sont pas élémentaires, ce qui empêche de connaître précisément l'énergie initiale engagée, le tout dans un environnement expérimental plus compliqué. Notons que cette dernière approche permet néanmoins également de réaliser des mesures de précision dans un domaine cinématique différent.

Cette combinaison de mesures précises d'effets quantiques à la frontière en intensité et de production directe de nouvelles particules à la frontière en énergie permet généralement d'apprendre beaucoup, quel que soit le résultat des observations. Même une absence de déviation entre les mesures de précision et les prédictions du modèle standard permet de contraindre fortement les théories au-delà du modèle standard. De plus, en cas d'observation d'un signal de nouvelle physique, ces mesures de précision, qu'elles soient en accord ou non avec les prédictions, seront précieuses pour établir la nature de ce signal.

Un autre sujet de recherche concernant les particules élémentaires est l'étude des neutrinos. N'interagissant que par l'interaction faible, ces particules défient le modèle standard, dans lequel elles devraient être sans masse. L'observation de leurs oscillations de saveur a néanmoins permis de montrer que ce n'est pas le cas, en déterminant des différences de masse non nulles entre les trois types de neutrinos, ouvrant ainsi une fenêtre sur la physique au-delà du modèle standard. La valeur absolue de leurs masses n'a cependant pas encore pu être mesurée. Ces particules pourraient également avoir joué un rôle important dans le déséquilibre matière-antimatière aux premiers instants de l'Univers, à travers un mécanisme appelé violation de la symétrie CP, dont le paramètre principal reste à mesurer. Par ailleurs, il reste encore à découvrir si ce sont des particules dites « de Majorana », c'est-à-dire si elles sont leurs propres antiparticules.

Le dernier volet de ce champ de recherche est l'étude de la chromodynamique quantique (QCD), théorie de l'interaction forte. Cette interaction est bien comprise dans le domaine perturbatif, où les quarks et gluons interagissent à courte distance (ou très haute énergie). Mais la plupart des phénomènes fondamentaux pour la compréhension de la structure de notre univers concernent le domaine non perturbatif de la QCD. Ainsi l'origine du confinement, de la masse des hadrons, ou l'existence de différentes phases de la matière hadronique font partie des questions ouvertes. Schématiquement, on peut distinguer deux domaines

d'étude. Le premier consiste à explorer, au moyen de collisions noyau-noyau à différentes énergies, la transition de phase entre la matière nucléaire, composée de hadrons, et un plasma de partons, composé de quarks et de gluons. Les collisions proton-proton ou proton-noyau servent de référence et permettent d'étudier les effets collectifs dans les petits systèmes. Le deuxième s'intéresse à la structure des hadrons, et en premier lieu celle du nucléon, que l'on cherche à décrire à partir des interactions entre quarks et gluons, en utilisant des mesures, le plus souvent exclusives, dans des réactions hadron-hadron ou électron-hadron.

## B. Physique nucléaire et applications

La physique nucléaire étudie la structure et la dynamique de la matière nucléaire dans les noyaux, et leurs implications pour la nucléosynthèse et pour les astres denses tels que les étoiles à neutrons. Ces recherches expérimentales sont menées à l'aide de faisceaux d'isotopes stables ou radioactifs obtenus par différentes techniques (comme ISOL, "Isotope Separation On Line", ou bien la fragmentation en vol), qui peuvent ensuite être post-accélérés ou non, selon les caractéristiques des faisceaux souhaités. Les isotopes eux-mêmes ou les produits de leurs réactions peuvent ensuite être étudiés à l'aide de détecteurs spécifiques, qui mesurent les caractéristiques des fragments et/ou des photons émis. Par ces techniques, le diagramme (N,Z) peut être exploré loin de la vallée de stabilité pour différents objectifs, tels que la recherche de nouvelles formes exotiques de radioactivité et l'étude de la structure des noyaux proches de la limite de stabilité en proton ou neutron, ou possédant un rapport N/Z extrême, la recherche d'éléments super-lourds, ou encore l'étude des états isomériques, super- ou hyper-déformés. La dynamique et les sections efficaces de différentes réactions d'intérêt peuvent également être étudiées grâce à ces installations.

Du côté théorique, plusieurs approches sont utilisées, calculs *ab initio*, interaction nucléaire effective, modèle en couche ou fonctionnelle de densité, dont certaines (notamment les calculs *ab initio*) nécessitent des moyens de calcul importants.

Certaines de ces recherches expérimentales et théoriques en physique nucléaire sont en relation avec l'astrophysique, et tout un pan de ces activités s'intéresse ainsi à la nucléosynthèse dans le cycle de vie des étoiles et aux propriétés des étoiles à neutrons.

Un autre aspect important de ces recherches est leur application au domaine des réacteurs nucléaires pour la production d'énergie. Cette activité est à la frontière entre la physique nucléaire, la physique des matériaux et la radiochimie. Les buts poursuivis sont notamment la comparaison entre les prédictions théoriques et les mesures de sections efficaces d'intérêt, les études de neutronique et du couplage avec tous les phénomènes physiques à l'œuvre dans un réacteur, la modélisation de réacteurs innovants, notamment les réacteurs rapides à sels fondus.

Enfin, une activité importante des équipes de l'IN2P3 concerne les recherches en lien avec la santé. Il s'agit principalement d'utiliser les rayonnements ionisants pour la compréhension du vivant, l'imagerie et la thérapie, notamment du cancer, grâce à des faisceaux de protons ou d'ions plus lourds. Ces recherches comprennent également les mesures de doses de rayonnements reçus et la modélisation et simulation de leurs interactions avec les tissus vivants.

## C. Astroparticules et cosmologie

Ce domaine de recherche se donne pour objet l'étude des particules et des rayonnements venus de l'espace comme messagers de l'Univers, permettant de comprendre sa dynamique, son évolution et sa composition, ainsi que les phénomènes astrophysiques qui s'y déroulent. Pour cela, il utilise entre autres les technologies développées pour l'étude de la matière aux échelles subatomiques, mises en œuvre dans de grandes infrastructures au sol ou dans des expériences embarquées sur satellites. Ce domaine se divise en trois thèmes principaux : les astroparticules, les ondes gravitationnelles et la cosmologie.

L'étude des astroparticules se concentre sur la détection des particules messagères, chargées ou neutres, et les phénomènes qui leur donnent naissance. Selon leur énergie, la détection peut se faire directement à l'aide de détecteurs placés en orbite (satellites, station spatiale internationale), ou au sol, en

détectant les produits de leurs interactions avec l'atmosphère terrestre. C'est le cas de certains observatoires au sol pour les particules chargées, ou des télescopes utilisant l'effet Čerenkov pour les photons de très haute énergie. Ces techniques permettent d'étudier les phénomènes cosmiques les plus violents de l'univers, les mécanismes de production et d'accélération du rayonnement cosmique ainsi que leurs progéniteurs, en ayant accès à des énergies supérieures à celles des accélérateurs de particules terrestres. Autres particules messagères du cosmos, les neutrinos sont également étudiés sur l'ensemble de leur spectre, depuis les très basses énergies qui pourraient témoigner des supernovae survenues depuis la naissance de l'Univers, jusqu'aux événements ultra énergétiques impliquant des processus hadroniques et observés par les grands réseaux de détecteurs sous-marins ou polaires. Ces messagers peuvent aussi être la signature de la présence de matière noire dans l'univers.

Le second thème concerne l'étude des ondes gravitationnelles, domaine qui a été ouvert avec les premières observations en 2015 et qui constitue désormais une nouvelle fenêtre observationnelle sur les phénomènes cosmiques. Les ondes gravitationnelles, qui correspondent à une perturbation de l'espace temps, sont émises par exemple lors de la coalescence de deux objets ultra-compacts comme les trous noirs et les étoiles à neutrons. Les signaux d'ondes gravitationnelles permettent d'étudier aussi bien les trous noirs stellaires, avec en jeu la compréhension des étapes finales de la vie des étoiles massives, que les trous noirs supermassifs, dont le processus de formation demeure un mystère. Elles représentent en outre l'opportunité de tester la relativité générale et de mesurer le taux d'expansion de l'univers, mais aussi de sonder les propriétés de la matière dans ses états extrêmes. Cette recherche nécessite de très grandes infrastructures au sol, dont le développement se poursuivra dans les prochaines décennies, mais pourra également utiliser des satellites dédiés qui permettent la détection des ondes gravitationnelles à plus basse fréquence, ainsi que la chronométrie des pulsars. Notons qu'avec la découverte des ondes gravitationnelles, le domaine des astroparticules entre maintenant dans l'ère des observations multi-messagers, faisant intervenir la recherche d'émission concomitante de particules chargées, de neutrinos ou de photons.

Le troisième thème de ce domaine concerne l'origine, l'évolution et la composition de l'Univers, et notamment la compréhension de ce que sont l'énergie noire et la matière sombre. L'existence de la première a été déduite grâce à la mesure de l'expansion accélérée de l'Univers à la fin des années 1990, et son étude se poursuit grâce à des observations au sol et depuis l'espace. La nature de l'énergie noire demeure l'une des plus grandes énigmes de la physique contemporaine, tandis que des solutions alternatives à la constante cosmologique sont proposées d'un point de vue théorique, comme un champ qui évoluerait dans le temps ou une modification des lois de la gravitation aux échelles cosmologiques. L'hypothèse de l'existence de matière sombre est quant à elle nécessaire afin de comprendre les observations de la rotation des galaxies, ainsi que certaines mesures de déviation de la lumière d'objets distants par des amas de galaxies plus proches. L'existence d'une telle matière sombre sur Terre est recherchée par la mise en évidence directe des interactions qu'elle pourrait avoir avec des détecteurs spécifiques. Elle est également recherchée activement par les expériences de physique des particules en collisionneur. En parallèle, la mesure précise de la polarisation du rayonnement cosmologique micro-onde (CMB) pour la recherche des ondes gravitationnelles primordiales permettra de tester les différents modèles d'inflation (phase d'expansion extrêmement rapide de l'Univers dans ses premiers instants) en s'appuyant sur des expériences au sol, ainsi que sur des instruments embarqués sur satellites.

## **D. Accélérateurs et technologie**

La physique des accélérateurs étudie tous les développements nécessaires pour l'amélioration des performances des accélérateurs existants, ceux requis pour les projets futurs, ainsi que l'industrialisation des processus pour permettre la construction à plus grande échelle. Il s'agit par exemple d'augmenter la fiabilité des accélérateurs, d'accroître les gradients et l'efficacité des structures accélératrices, de pouvoir soutenir des faisceaux de plus grande intensité, ou encore de développer des mécanismes de récupération et d'économie d'énergie.

Les équipes de l'IN2P3 contribuent à la R&D accélérateurs avec une orientation prioritaire vers le développement des machines pour les programmes de physique de l'institut. Ces équipes ont une expertise technique reconnue internationalement pour les accélérateurs linéaires RF supraconducteurs, où elles

interviennent sur des très grands projets en collaboration avec les équipes du CEA. Elles ont contribué par exemple aux trois machines de forte visibilité internationale que sont le linac de SPIRAL2 (GANIL), le LINAC du XFEL à DESY, et le LINAC d'ESS.

Les équipes sont structurées autour de projets phares de l'institut de tailles inégales. L'accélération et la production d'ions lourds radioactifs mobilise plus de la moitié des FTE de R&D accélérateurs. Les objectifs de ce programme sont de comprendre et maîtriser les processus de production de faisceaux d'ions lourds et radioactifs intenses et de développer les technologies adéquates. Ce programme est en appui du développement des accélérateurs du GANIL.

Trois autres thèmes se partagent les FTE restants par ordre décroissant :

Le programme sur les cavités supraconductrices et accélérateurs linéaires de protons, a pour objectif d'une part de mieux comprendre la physique des cavités supraconductrices pour optimiser les gradients accélérateurs et l'efficacité des cavités, et d'autre part de mieux comprendre la physique des faisceaux de hadrons de forte intensité pour améliorer les modèles de simulation, et à terme le contrôle et la stabilité des faisceaux pendant le fonctionnement des accélérateurs.

Le développement de concepts pour des sources intenses d'électrons ou de photons innovantes est étudié dans le contexte d'utilisation pour des applications sociétales ou industrielles.

L'accélération laser plasma et les collisionneurs à forte énergie : ce programme a pour but de comprendre et maîtriser la dynamique des faisceaux pour les collisionneurs de physique des particules et d'identifier et développer les technologies les plus adaptées. Cette activité est en étroite synergie avec le développement des collisionneurs développés au CERN. Un volet exploratoire est développé à travers l'étude de concepts accélérateurs avancés, prometteurs pour repousser les limites actuelles en énergie ou en précision.

## **E. Interdisciplinarité**

Parallèlement aux sujets de recherche évoqués précédemment, des équipes de l'IN2P3 mènent des études interdisciplinaires dans des domaines liés aux réactions nucléaires, aux propriétés des éléments radioactifs ou aux rayonnements ionisants .

Le premier axe de recherche de ce type concerne les études associées à la production d'énergie d'origine nucléaire. Il s'agit de la modélisation et des études des couplages entre les différents phénomènes en jeu pour la physique des réacteurs, des modélisations et mesures de sections efficaces d'intérêt, de mesures de neutronique, des études de scénarios d'évolution du parc électronucléaire et de gestion du plutonium, et enfin des études de filières innovantes, telles que les réacteurs à sels fondus. Un autre type d'études reliées à l'énergie nucléaire concerne les radionucléides dans l'environnement, ainsi que la gestion ou la transmutation des déchets.

Un autre axe important développé à l'institut se rapporte aux techniques reliées à la physique nucléaire ou corpusculaire au service de la santé. Il s'agit principalement des recherches concernant les techniques innovantes d'imagerie, la radiobiologie, les techniques de détection de particules et la modélisation des effets biologiques pour la radiothérapie et l'hadronthérapie, et les radioisotopes pour l'imagerie et la thérapie.

Un troisième sujet porte sur l'étude de noyaux ou de molécules organiques dans l'Univers, et le dernier axe concerne le développement de techniques de physique nucléaire et de physique des particules pour l'exploration et l'imagerie de la Terre et de l'environnement, notamment pour l'archéologie.

---

## **III. Le Conseil scientifique d'institut**

---

Le Conseil scientifique d'institut conseille et assiste par ses avis et ses recommandations la direction de l'institut de manière prospective sur la pertinence et l'opportunité des projets et activités de l'institut. Il est

consulté sur la nomination de membres des jurys d'admission des chargés de recherche. S'agissant des créations et suppressions d'unités, le Conseil scientifique est informé de l'ensemble des avis des sections et des positions de l'institut. Il est consulté sur les points de divergences entre les avis des sections et les positions de l'institut. Actuellement, les activités scientifiques de l'IN2P3 sont principalement regroupées dans la section 01 du Comité national (Interactions, particules, noyaux, du laboratoire au cosmos), mais d'autres sections ou CID peuvent être consultées pour des créations ou suppressions d'unités comportant des activités scientifiques communes. Le Conseil scientifique est constitué de 24 membres (12 élus et 12 nommés par la direction de l'institut). Il possède un bureau, composé d'un président (élu) et de 4 membres (2 élus et 2 nommés), dont un secrétaire scientifique. A la fin de son mandat, le Conseil scientifique d'institut élabore un rapport de prospective.

## A. Fonctionnement des sessions du Conseil

Le Conseil scientifique de l'IN2P3 se réunit trois fois par an, à la demande de la direction, pour des sessions de deux jours. La première journée est consacrée à une session ouverte lors de laquelle sont présentés des projets scientifiques. Elle est suivie d'une session fermée, qui peut commencer à la fin de la première journée et s'étend généralement jusqu'à la fin de la deuxième. Durant notre mandature, trois sessions ont été consacrées uniquement à des travaux en séance fermée :

- janvier 2019 : session d'installation, élection du président et du bureau,
- février 2019 : session préparatoire à la suite de la mandature, fonctionnement du Conseil
- octobre 2019 : session portant sur l'exercice de prospective de l'institut

Toutes les autres sessions se sont déroulées sur deux jours, sur le modèle suivant.

Le thème de la session est établi en concertation avec la direction de l'IN2P3, d'une séance pour l'autre, et l'ordre du jour précis (thème des exposés, orateurs, rapporteurs extérieurs) est mis au point ensuite par la direction de l'IN2P3 et un groupe de travail *ad hoc* de membres du Conseil comportant le président et quelques membres volontaires, différents à chaque session. Le fait d'organiser les sessions de façon thématique a l'avantage d'aboutir à une cohérence interne à chaque séance, mais peut aussi empêcher le passage rapide en Conseil scientifique de certaines expériences spécifiques pour lesquelles un positionnement rapide de l'IN2P3 serait souhaitable. Il est arrivé que de tels projets soient examinés lors d'une session d'un thème différent, à la demande de la Direction qui souhaitait recueillir rapidement l'avis du Conseil. De plus, les sujets abordés par les Conseils scientifiques des laboratoires ne sont pas toujours bien synchronisés avec ceux abordés au niveau de l'institut.

Nous recommandons donc de réfléchir à la possibilité pour les laboratoires de faire remonter des sujets à traiter en CSI, et bien sûr, d'anticiper autant que possible l'établissement des ordres du jour.

Lors de la session ouverte, les projets présentés peuvent l'être soit « pour information », soit « pour examen et avis du Conseil ». Dans ce dernier cas, des personnalités extérieures peuvent être sollicitées, et invitées à participer aux travaux du Conseil. Cette session est publique, et s'est tenue principalement au campus Michel-Ange à Paris, à l'exception de trois sessions organisées dans d'autres laboratoires (APC et LPNHE). La session ouverte est enregistrée en vidéo. L'ensemble des vidéos sont en accès libre sur le site du Conseil : (<https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/le-conseil-scientifique-de-lin2p3>) pour cette mandature, et sur le site du CC-IN2P3 (<https://webcast.in2p3.fr/>) depuis fin 2003.

La session ouverte comprend les exposés des orateurs ainsi que les premiers commentaires et questions des rapporteurs extérieurs, des membres du Conseil, ainsi que du public, composé généralement de membres des laboratoires de l'IN2P3. L'information concernant la tenue d'une session ouverte du Conseil est diffusée :

- sur le site web du Conseil, qui comprend toujours les dates des prochaines sessions et l'ordre du jour dès qu'il est établi,
- par la « Lettre de l'IN2P3 » qui est diffusée à l'ensemble des personnels de l'institut,
- par un courriel du président aux directeurs d'unités de l'institut, avec demande d'en assurer la diffusion auprès de tous les personnels,

- par une annonce du président sur la liste de diffusion de la division de physique des particules de la Société Française de physique (SFP-HEP-FORUM-L@IN2P3.FR),
- par un courrier aux chefs de service et à la direction de l'IRFU (Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers du CEA).

Préalablement à chaque session, les équipes dont les travaux sont présentés sont sollicitées pour fournir au Conseil un document exposant les différents aspects du projet. Nous précisons systématiquement aux équipes que ce texte peut réutiliser une grande partie d'éléments déjà rédigés dans d'autres circonstances, tels que des appels à projets ou des présentations à d'autres comités, car le but n'est évidemment pas de surcharger les personnels avec un travail supplémentaire trop important. Cependant, nous demandons aux équipes de veiller à ce qu'elles répondent à un certain nombre des questions, et nous leur donnons pour cela un guide de quelques pages, qui se trouve en annexe 2. Le document retourné par les équipes un mois avant la session est distribué aux membres du Conseil et, pour les sujets examinés « pour avis », aux personnalités extérieures qui rédigent un rapport (interne uniquement) exposant leur évaluation du projet.

La session fermée comprend trois phases différentes dans les discussions :

- Sessions de questions avec les orateurs en présence des rapporteurs extérieurs et de la direction. Cette phase permet aux équipes dont les projets sont examinés d'apporter des compléments d'information qu'elles n'auraient pas pu exprimer en session ouverte, ou de répondre plus complètement à certaines questions. Elle permet également à la direction de suivre les discussions avec le Conseil et de poser des questions. Par tradition, à la fin de cette discussion, un moment est aussi alloué sans la présence de la direction, pour que les sujets délicats éventuels puissent être portés à la connaissance des membres du Conseil. Le plus souvent, aucun commentaire spécifique n'est ajouté, mais il est important que cet espace d'écoute libre soit maintenu au cas où il s'avérerait nécessaire. A la fin de cette phase, les équipes et les rapporteurs extérieurs quittent la réunion.
- Discussion avec la direction. Différents points statutaires peuvent y être abordés, des informations sont transmises par la direction, les questions des membres du Conseil sont abordées, et un retour sur les actions menées par la direction suite à une session précédente (12 à 18 mois après) est demandé. La direction quitte la réunion à l'issue de cette discussion.
- Discussions internes au Conseil. Généralement, une discussion interne au Conseil est tenue préalablement à l'échange avec la direction, afin de préparer les questions abordées. Une deuxième discussion interne en fin de session permet d'échanger sur l'ensemble des éléments recueillis, afin de préparer les recommandations et la rédaction du compte rendu.

Il est également prévu que des personnes soient invitées de façon permanente aux travaux du Conseil. Durant notre mandature, les invités permanents étaient deux membres du Conseil scientifique du CNRS, Philippe Balcou et Juan José Hernandez Rey, ainsi que Raphaël Granier de Cassagnac, puis Piera Ghia, qui ont exercé successivement la présidence de la section 01. Nous les remercions vivement de leur participation aux sessions du Conseil.

En ce qui concerne l'examen des projets, pour chaque thème abordé, un groupe de travail (GT) interne au Conseil est défini en amont de la session, l'objectif étant que chaque GT d'au moins deux personnes prépare les questions pour la session ouverte et pour la session fermée, et rédige la première version du compte rendu qui est ensuite soumise à l'ensemble du Conseil pour amendements.

Nous avons initialement l'ambition d'écrire un pré-rapport en amont des sessions pour la partie résumé. La partie avis et recommandations aurait alors pu être rédigée en session fermée après l'ensemble des discussions, ce qui aurait permis de la communiquer beaucoup plus rapidement à la direction et aurait simplifié et raccourci la rédaction du compte rendu final. Nous n'avons finalement pas réussi à mettre cette pratique en place, et il en a résulté un retard dans la rédaction des comptes rendus, qui s'est accentué lors de la période de confinement due au Covid. Il faut également noter que les ordres du jour ont toujours été très conséquents, ce qui pose des problèmes d'emploi du temps des sessions, des difficultés à trouver des rapporteurs en nombre suffisant, et fatalement des difficultés à converger rapidement vers une version finale du compte rendu.

Nous recommandons donc à la prochaine mandature de veiller à ce que les ordres du jour ne soient pas pléthoriques.

Durant la pandémie de Covid-19, toutes les sessions (ouvertes et fermées) se sont tenues par visioconférence, à l'aide du logiciel Zoom.

L'ensemble des documents de chaque session est en accès libre sur la page web du Conseil : <https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/le-conseil-scientifique-de-lin2p3> qui regroupe notamment l'ordre du jour, les documents préparatoires fournis par les équipes, et quelque temps après la session, le compte rendu. Nous remercions ici Emmanuel Jullien pour son aide concernant la mise en ligne des documents, et Olivier Drevon pour la captation vidéo des sessions ouvertes.

Pour l'ensemble de ses travaux, le Conseil reçoit l'aide d'un(e) assistant(e) du Comité national, en l'occurrence Danuta Duffrat-Chabrière, dont l'aide nous a été précieuse tout au long de notre mandature et que nous remercions chaleureusement.

## **B. Autres travaux du Conseil**

Les membres du Conseil Scientifique ont participé à une réunion extraordinaire du comité national le 4 juillet 2019, ayant abouti au vote du rapport « La recherche publique en France en 2019 : Diagnostic et propositions du Comité national ». Ce document est disponible à l'adresse suivante : [https://c3n-cn.fr/sites/default/files/u88/Propositions\\_Comitenational\\_Juillet-2019.pdf](https://c3n-cn.fr/sites/default/files/u88/Propositions_Comitenational_Juillet-2019.pdf) .

Nous avons élaboré une recommandation publique, concernant la loi de programmation pluriannuelle de la recherche (LPPR), disponible à l'adresse suivante : [https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/IN2P3/CS-IN2P3\\_Recommandation-sur-LPPR.pdf](https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/IN2P3/CS-IN2P3_Recommandation-sur-LPPR.pdf) .

Le président (la présidente) du Conseil scientifique d'institut participe de droit à la Coordination des instances du Comité national du CNRS (C3N). Les travaux de cette commission sont disponibles à l'adresse suivante : <https://c3n-cn.fr/> .

---

## **IV. Projets et expériences examinés par le Conseil ces dernières années**

---

Les principaux projets présentés au Conseil durant les cinq dernières années sont regroupés par thèmes dans les paragraphes ci-dessous. Les présentations liées aux deux domaines transverses que sont les « Accélérateurs et technologies associées » et « Interdisciplinaire » sont ici mentionnées dans le thème le plus proche selon le découpage Particules/Nucléaire/Astroparticules. La liste des sessions correspondantes est disponible en annexe.

### **A. Physique des particules et physique hadronique**

Les sessions consacrées à cette thématique ont permis de présenter les activités suivantes :

- jouvences de LHCb, Belle-2 et ALICE, physique des ions lourds au HL-LHC, première présentation de EIC,
- physique des neutrinos, avec les expériences JUNO, ORCA, DUNE, T2K, Super-Kamiokande et le projet Hyper-Kamiokande
- les développements d'accélérateurs,
- et des activités de théorie et de calcul reliées à ce domaine.

### **B. Physique nucléaire et applications**

Concernant la physique nucléaire, différents aspects ont été présentés lors de nos sessions de ces cinq dernières années. Il s'agit :

- des projets utilisant des faisceaux post-accélérés, notamment auprès d'ALTO, au GANIL et à FAIR, avec les projets Nu-Ball, AGATA, GRIT et PARIS, ainsi que les recherches d'éléments super-lourds et les études de ligne de stabilité à RIKEN,
- de la physique nucléaire pour l'énergie, avec les problèmes de couplages multi-physiques, les mesures nucléaires, la neutronique, les calculs de scénarios et de gestion du plutonium, et les recherches reliées aux réacteurs à sels fondus,
- des plateformes d'irradiation labellisées, qui ont fait l'objet d'une session entière,
- des activités en matière d'accélérateurs, avec notamment les contributions à ESS et MYRRHA,
- et des activités de théorie et de calcul HPC reliées à ce domaine.

## C. Astroparticules et cosmologie

Plusieurs sessions ont été consacrées à cette thématique tout au long de la mandature :

- les projets spatiaux à l'IN2P3 ont fait l'objet d'une session dédiée, avec les expériences ou projets Fermi, AMS, Planck, SVOM, Euclid, LISA et EUSO
- l'étude du fond diffus cosmologique et les ondes gravitationnelles ont fait l'objet de deux sessions, dont l'une consacrée aux complémentarités sol-espace. Les projets concernés sont LSST, DESI, CMB-SO, CMB-S4, KID-NIKA2, QUBIC, Euclid, LiteBIRD, Virgo\_nEXT, LISA, ET,
- une session a été consacrée à la recherche directe de matière noire, avec TESSERACT, DAMIC, MIMAC, XENONnT, DARKSIDE, MADMAX,
- les activités de théorie et de calcul reliées à ce domaine ont également été présentées.

---

## V. Sujets qui n'ont pas pu être examinés lors de notre mandature

---

Le nombre de sessions du Conseil étant limité à trois par an, certains sujets correspondants à des activités majeures de l'institut n'ont pas pu être examinés lors de notre mandature, faute de temps. Nous suggérons à la nouvelle équipe de poursuivre l'examen des sujets selon le cycle initié précédemment, en s'intéressant notamment aux activités énumérées ci-dessous.

### A. Physique des particules : jouvences ATLAS et CMS pour le HL-LHC

La construction des éléments nécessaires aux jouvences des détecteurs ATLAS et CMS pour le HL-LHC progresse, en vue de leur installation pendant le « Long Shutdown 3 » qui devrait commencer en 2026. Ces jouvences sont de grande envergure : remplacement intégral des détecteurs internes de particules chargées, de la majorité de l'électronique de lecture et des systèmes de déclenchement, ajout de détecteurs temporels, remplacement de la partie bouchon des calorimètres, etc. Cela implique une installation complexe, contrainte par les éléments de détecteurs conservés (aimants, calorimètres, chambres à muons, ...) et un taux de radiation ambiant requérant des mesures de protection du personnel. Après l'installation, les collaborations devront comprendre et maîtriser des équipements qui seront composés en grande partie de nouveaux détecteurs, ce qui demandera un effort probablement comparable à la mise en route du début du LHC.

Pour assurer le succès du HL-LHC il sera donc important d'assurer l'apport de ressources suffisantes tant pour l'installation que la mise en route des expériences. Le Conseil devra épauler la direction dans l'évaluation des contributions de l'IN2P3 à ces efforts.

### B. Physique hadronique : EIC

Du côté de la physique hadronique, le nouvel accélérateur EIC (Electron Ion Collider) à Brookhaven ouvrira, à l'horizon 2030, un champ de mesures inexploré dans le domaine de la structure du nucléon, qui viendront compléter le programme en cours à JLab. Le projet utilisera le faisceau d'ions existant du RHIC et un nouveau faisceau d'électrons polarisés, pour produire des collisions électron-ion à des énergies dans le centre masse entre 20 et 140 GeV. Ce domaine d'énergie est particulièrement adapté pour étudier le rôle des gluons dans la structure de la matière et répondre aux questions ouvertes de l'origine du spin et l'origine

de la masse des nucléons. L'IN2P3 participe à la R&D pour le projet de détecteur ePIC, en contribuant en particulier au niveau de la conception mécanique et de l'électronique du calorimètre électromagnétique ainsi que l'électronique de lecture des détecteurs très proches du faisceau ("roman pots"). Une première présentation du projet, sous forme d'un point d'information, a eu lieu à la session du Conseil de juin 2022. Le projet va entrer prochainement dans la phase de construction et la contribution de l'IN2P3 devra être précisée. Un examen du projet au début de la prochaine mandature du CSI nous semble donc pertinent.

### **C. Désintégration double-bêta sans neutrino**

La désintégration double-bêta sans neutrino ( $0\nu\beta\beta$ ) est un processus nucléaire rare hypothétique d'importance fondamentale en physique des particules et en cosmologie. Cette thématique a été examinée en 2018 lors de la précédente mandature.

Aujourd'hui plusieurs activités sont menées au sein de l'IN2P3 avec différents niveaux de maturité et d'implication : CUPID, SuperNEMO, R2D2, nEXO et DARWIN (section « double-bêta »). Dans le contexte international, il est intéressant de mentionner les recommandations du DoE et d'ApPEC. Lors du « 2023 Long Range Plan in Nuclear Science » du DoE (octobre 2023), la recherche de la désintégration double-bêta est mentionnée comme une « priorité absolue » dans la recommandation n°2. Trois projets futurs sont mentionnés par le DoE : CUPID, LEGEND-1000 et nEXO. De manière similaire, ApPEC recommande de soutenir ces trois expériences [1].

Compte tenu du contexte international et des compétences remarquables que la France a développées dans cette recherche, nous recommandons à la nouvelle équipe d'examiner les différentes propositions de participation de l'institut. Cela permettra à l'IN2P3 d'élaborer une feuille de route claire et incisive, et de s'engager avec les ressources humaines et financières requises pour jouer un rôle de premier plan dans ce domaine à l'échelle internationale.

### **D. Physique nucléaire de basse énergie**

L'exploration des noyaux exotiques situés loin de la ligne de stabilité bêta est un objectif majeur de la physique nucléaire moderne, car elle fournit des références pour notre connaissance des forces nucléaires en jeu à l'intérieur du noyau. Lors de la session du Conseil scientifique de juin 2019, les expériences liées aux faisceaux ré-accélérés ont été examinées. Les activités liées à la physique nucléaire à basse énergie qui émergent autour de la technique ISOL, ont été traitées par le Conseil scientifique lors de la précédente mandature en octobre 2017. Cependant, il semble pertinent de l'examiner à nouveau dans le cadre de la construction et exploitation de l'infrastructure de basse énergie DESIR au GANIL.

Le principal objectif de la collaboration DESIR (Décroissance, Excitation et Stockage d'Ions Radioactifs) est l'étude de la structure des noyaux exotiques, les interactions fondamentales qui déterminent leurs propriétés, ainsi que la formation de ces noyaux dans l'Univers. La communauté française dans le domaine de la basse énergie développe l'instrumentation nécessaire pour mener ces études avec une grande précision. De nombreux développements expérimentaux sont menés par les équipes françaises regroupées sous la plateforme ISOL-France. L'obtention des données nucléaires est abordée avec des installations expérimentales complémentaires qui seront placées dans la salle DESIR. La construction du bâtiment a commencé en 2023 et devrait aboutir en 2025. Les premières expériences sont prévues en 2026 avec faisceaux stables et en 2027 avec des faisceaux radioactifs.

Le Conseil devra probablement examiner les priorités scientifiques du projet DESIR ainsi que sa coordination avec ALTO et S3-LEB. De même, nous recommandons à la nouvelle mandature d'évaluer les ressources nécessaires à la mise en marche des expériences associées afin d'assurer le succès du projet.

### **E. Astroparticules**

Les projets sol relatifs au rayonnement cosmique ont été examinés par le Conseil en 2017 lors de la précédente mandature.

En ce qui concerne l'astronomie gamma de très haute énergie, le projet CTA est maintenant dans la phase de production et construction, avec un premier télescope installé sur le site Nord de La Palma depuis 2018, et de nouveaux télescopes en construction qui seront installés à partir de 2024. Le projet a été ralenti par le retard de la mise en place de l'entité légale européenne qui supervisera la construction et les opérations de l'observatoire, qui devrait se finaliser cette année. Par conséquent, une nouvelle organisation du consortium scientifique sera établie pour la préparation et l'exploitation des projets scientifiques principaux (« Key Science Projects » ou KSP) qui seront les principales observations de CTA. Nous recommandons un examen du projet dans cette nouvelle phase pour comprendre le rôle des équipes françaises dans la nouvelle organisation et pour optimiser le retour scientifique de ces observations clés pour l'institut.

En ce qui concerne les neutrinos astrophysiques, ils sont les seuls messagers de l'Univers à pouvoir à la fois se propager sur des distances cosmologiques et nous renseigner sur les processus hadroniques ayant lieu au cœur des accélérateurs cosmiques. Leur détection représente donc un challenge de l'astronomie multi-messagers moderne. En particulier dans le régime des hautes énergies, IceCube a mis en évidence un fond diffus de neutrinos dont l'origine reste aujourd'hui encore largement inconnue. C'est pourquoi la mise en œuvre de KM3NeT, avec notamment le déploiement du détecteur ARCA, est cruciale pour le positionnement de la France dans la compréhension de ce fond diffus.

En parallèle, dans le régime des ultra hautes énergies, la détection des rayons cosmiques par l'observatoire Pierre Auger, prédit un flux de neutrinos cosmogéniques, résultant de l'interaction de ces rayons cosmiques avec les différents fonds diffus électromagnétiques de l'Univers (CMB, EBL, etc.). La détection de ce fond cosmogénique est la seule façon d'étudier le contenu hadronique de l'Univers à haut redshift. De plus, il est aussi attendu que les sources transitoires de hautes énergies, tels que les sursauts gamma ou les fusions d'étoiles à neutrons, produisent aussi des neutrinos d'ultra haute énergie. Ce régime d'énergie est donc un élément clé de l'astronomie multi-messagers des sources transitoires explosives. Il est crucial pour la communauté française de se positionner stratégiquement dans ce domaine inexploré.

Le Conseil devra dresser un bilan des contributions de la France et évaluer l'impact scientifique des équipes françaises dans ce domaine. Il devra également apprécier l'opportunité de contribuer à des projets tels que GRAND (Giant Radio Array for Neutrino Detection), en tenant compte des calendriers de ces projets.

## F. Interdisciplinarité

Lors de la précédente mandature, deux sessions avaient été consacrées aux recherches sur la santé (juin 2015) et à la radiochimie (octobre 2016). Ces sujets, en marge des activités « cœur de métier » de l'IN2P3, couvrent des compétences spécifiques et font partie des « applications du nucléaire ». Lors des prospectives nationales de l'IN2P3, deux groupes de travail y ont été dédiés (GT10 : Applications associées : sciences nucléaires et vivant ; et GT11 : Énergie nucléaire et environnement).

Ces activités ont été en partie traitées au cours de notre mandature, notamment lors des sessions consacrées aux plateformes d'irradiation labellisées IN2P3 (février 2020), à l'accélération et au développement d'accélérateurs (février 2021), à la théorie, incluant les thématiques nucléaire, particules (dont gravitation) et astroparticules (juin 2021), à la physique nucléaire pour l'énergie (février 2022), au calcul et données (juin 2022).

Les deux sujets principaux manquant à nos yeux dans cette liste concernent la chimie ainsi que les activités liées à la santé. Dans le premier cas, les études de spéciation et de transport dans l'environnement et la corrosion des cuves dans le contexte des réacteurs nucléaires à sels fondus (voir compte-rendu de février 2022) n'ont pas été traitées. Concernant les activités liées à la santé, elles ont été seulement vues sous l'angle des plateformes et des accélérateurs, ou encore des outils numériques. Il serait intéressant d'avoir un retour scientifique plus précis sur ces activités en termes de projets de recherche en tant que tels. Nous recommandons donc à la nouvelle mandature de s'emparer de ces sujets. De plus, il serait intéressant de faire un bilan du changement de mode de fonctionnement des projets interdisciplinaires de l'institut (qui

est passé de « master projets » à financement récurrent des équipes impliquées), associé à la suppression du portefeuille numéraire du DAS « Interdisciplinarité » de l'IN2P3.

---

## VI. Projets examinés pour lesquels nous recommandons un suivi

---

Pour un certain nombre de sujets examinés, il nous a semblé qu'un suivi par le Conseil serait nécessaire.

### A. Les jouvences de LHCb et ALICE

L'objectif principal de la collaboration LHCb est l'étude de précision, avec des collisions proton-proton, de la violation de CP et des désintégrations semi-leptoniques rares dans les secteurs de la beauté et du charme, en vue de contraindre la physique au-delà du modèle standard. Le programme d'ALICE est centré sur les études, avec des collisions d'ions lourds, des propriétés de la matière hadronique déconfinée et de ses interactions. Lors de la session de février 2023, les collaborations LHCb et ALICE ont chacune présenté un projet de jouvence pour les dernières années de la phase « haute luminosité » du LHC (HL-LHC), en vue d'une exploitation entre 2035 et 2038 (Run 5), avec une dernière prolongation potentielle en 2040-2041 (Run 6).

Ces jouvences sont de grande envergure, puisqu'elles représentent chacune entre la moitié (pour ALICE) et les deux-tiers (pour LHCb) du budget de l'ensemble des jouvences de CMS ou d'ATLAS. Le Conseil note également que ces jouvences sont très tardives, ce qui conduira à un temps d'exploitation plus court et engendrera un calendrier encore plus serré, et donc plus risqué, que ceux d'ATLAS ou CMS. Le moindre retard pris sur le calendrier envisagé aujourd'hui mettrait en péril la valeur de leur retour scientifique. Par ailleurs, une compensation de ce retard par une prolongation du programme HL-LHC pourrait affecter sérieusement le démarrage du programme de collisionneur post-LHC au CERN, définissant une fenêtre d'opportunité très limitée.

Avec les informations dont il disposait alors, le Conseil a estimé qu'il était prématuré de s'engager formellement dans ces jouvences, pour lesquelles le retour sur investissement mérite d'être clarifié, les risques mieux évalués, et la capacité à réunir les ressources nécessaires – tant humaines que financières – confirmée. Nous recommandons de procéder dans un futur proche - idéalement bien avant la prochaine mise à jour de la stratégie européenne - à un nouvel examen approfondi de ces deux projets, en les situant dans le contexte plus global du programme post-LHC au CERN. Dans ce cadre, le Conseil recommande également, lors de la même session, un examen des objectifs scientifiques d'ATLAS et de CMS (et de leur combinaison) au HL-LHC, afin de se former une opinion sur une transition optimale entre le LHC et le prochain collisionneur au CERN.

### B. DUNE

DUNE ("Deep Underground Neutrino Experiment") est une expérience de neutrinos de longue distance auprès de l'infrastructure LBNF ("Long Baseline Neutrino Facility") au Fermilab, près de Chicago. DUNE s'appuie sur le projet PIP-II d'augmentation en intensité du faisceau de protons de Fermilab et sur la plateforme Neutrino du CERN pour le développement et le test de prototypes. Le projet DUNE comporte deux détecteurs, l'un proche de l'accélérateur, l'autre installé à 1300 km de distance au laboratoire souterrain de Sanford, dans le Dakota du Sud. Le détecteur lointain se compose de 4 cryostats identiques comportant chacun un module d'environ 10 kt d'argon liquide. Le projet a été passé en revue par le Conseil lors de sa session d'octobre 2021. Un MoU ("Memorandum of Understanding") a été signé le 17 novembre 2023 entre Fermilab et ses partenaires internationaux (incluant le CERN, le Brésil, le Canada, l'Espagne, la France, l'Italie, la République Tchèque et le Royaume Uni), spécifiant le contexte institutionnel, organisationnel et financier, pour l'exécution partagée du programme de DUNE. Le projet DUNE fait partie des initiatives de plus haute priorité recommandées en décembre 2023 par le comité P5 aux États-Unis.

Il est prévu que DUNE fonctionne sur accélérateur avec deux modules du détecteur lointain à partir de 2031. Ce calendrier très ambitieux exige un effort soutenu entre les tests et le début de la production, et nécessite une organisation minutieuse au sein des équipes de l'IN2P3. Nous recommandons d'organiser des revues techniques en profondeur aux étapes clés du projet (avec rapporteurs extérieurs), pour s'assurer que la composition des équipes est optimale à tout moment et que le détecteur sera opérationnel dans les temps. Il conviendra de veiller à ce que les besoins d'effectifs sur place pour assurer le fonctionnement du détecteur lointain soient répartis entre les différentes équipes signataires du MoU, afin que cette responsabilité ne réduise pas la capacité des équipes de l'IN2P3 à participer aux analyses de physique.

La compétition dans le domaine des neutrinos est intense, en particulier avec le projet Hyper-Kamiokande (HK) au Japon. Nous estimons indispensable que les équipes de l'IN2P3 identifient les sujets de physique pouvant apporter un retour scientifique rapide de DUNE, dans lesquels elles devront s'impliquer fortement très rapidement. Pour assurer un retour scientifique fort et rapide, cette stratégie scientifique devra être basée soit sur des mesures uniques spécifiques à DUNE soit sur une complémentarité fondamentale avec les autres projets. Pour le plus long terme, le calendrier des mesures de précision et de leurs implications pour la physique devra être ré-établi et clairement communiqué, dans différentes hypothèses pour l'avancement du projet PIP-II et du détecteur lointain, et en supposant le succès des autres expériences de neutrinos selon leurs calendriers respectifs. Nous recommandons également que les équipes étudient la possibilité de s'impliquer dans les mesures faites à l'aide des détecteurs proches. Ceci permettrait d'acquérir une meilleure connaissance de la détermination des incertitudes systématiques, et optimiserait ainsi l'impact de leurs analyses.

Il est donc suggéré que soit programmée une nouvelle présentation de DUNE devant le Conseil, idéalement avant le début de la construction du module n°2 (c'est à dire au tout début de la nouvelle mandature si le calendrier est respecté), pour que le Conseil soit tenu informé des points suivants :

- les forces en présence à l'IN2P3 et leur évolution, accompagnée d'une comparaison quantitative avec les autres acteurs de la collaboration ;
- les conclusions des revues techniques qui auront été menées ;
- les études de risque mises à jour, tant au niveau technique qu'au niveau scientifique ;
- les stratégies d'analyse envisagées pour les retours scientifiques potentiellement rapides, ainsi que le plan d'analyse à plus long terme.

### **C. Le CMB et Simons Observatory (SO)**

Les mesures de la polarisation du CMB sont au cœur des nouvelles générations d'instruments afin de tester la physique de l'Univers primordial, et de contraindre le secteur des neutrinos (somme des masses et nombre effectif de degrés relativistes). C'est dans ce contexte que Simons Observatory a démarré depuis quelques mois avec, dans un premier temps, la mise en service des "Small Aperture telescope" (SAT) qui sera bientôt suivie du démarrage du "Large Aperture Telescope" (LAT) sur le plateau d'Atacama au Chili. Quelques membres de la communauté CMB de l'IN2P3 contribuent à SO à titre individuel aujourd'hui, avec de fortes responsabilités dans l'analyse de données SAT (APC) et LAT (IJCLab). La question d'une contribution institutionnelle permettant à un plus grand nombre de chercheurs/chercheuses d'avoir accès aux données SO a été effleurée lors de la séance de juin 2023. Depuis, des discussions sont en cours autour d'un télescope haute fréquence de type SAT équipé de KIDS Français. Il serait utile de revoir ce projet, la faisabilité dans le temps imparti et le retour scientifique, incluant l'accès aux données SO dans leur ensemble.

### **D. L'Intelligence Artificielle et le calcul Haute Performance**

Le Conseil a dédié sa session de juin 2022 au calcul et traitement des données, incluant une discussion sur l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) et le calcul haute performance (HPC) au sein des projets de l'IN2P3.

Pour le premier sujet, ces efforts se sont développés de manière essentiellement « organique » : durant le travail d'optimisation de la simulation, de reconstruction et d'analyse, les physiciens et ingénieurs se tournent vers les outils les plus performants, qui sont aujourd'hui basés sur l'IA.

Le Conseil a observé que le moment était probablement venu d'évaluer si, pour certains aspects du moins, une coordination de ces efforts pourrait être bénéfique. Il a aussi noté que l'activité des équipes à l'IN2P3 correspondait souvent à l'utilisation de techniques d'IA établies, et que les développements originaux en IA n'étaient pas majoritaires. D'autre part, les activités IA en tant que telles ne sont pas obligatoirement publiées, et leur visibilité gagnerait à être élargie.

Un autre symptôme du manque de développements originaux est la faible participation des équipes IN2P3 aux principaux ateliers de travail dans le domaine (par exemple ML4Jets qui maintenant couvre bien plus que les jets). Il serait donc utile de revoir ce sujet assez tôt dans la nouvelle mandature pour évaluer comment remédier à ce manque d'activité dans le domaine.

Concernant le Calcul Haute Performance (HPC) et les calculs sur GPU, les besoins sont croissants dans certaines disciplines (études du ciel transitoire, cosmologie), tandis qu'ils sont encore en discussion au sein des collaborations pour d'autres (HL-LHC).

Les technologies sous-jacentes demandent des compétences et des développements spécifiques. Le passage des architectures classiques aux architectures accélérées (FPGA, GPU, HPC) en général et aux architectures hybrides posent notamment la question de la compatibilité des codes avec les futurs centres de calcul, et nécessite des compétences techniques spécialisées pour s'adapter aux architectures spécifiques au HPC.

Se pose également la question de l'accès des membres de l'IN2P3 aux mésocentres et aux machines dédiées à ce type de calcul. Sans une stratégie bien définie dans ce domaine, le risque est de réduire la visibilité de l'institut dans l'analyse de données des grands projets internationaux s'appuyant sur ces technologies, puisque prendre des responsabilités et des engagements sur le calcul nécessitera de pérenniser un accès garanti aux mésocentres, très limité aujourd'hui.

Il serait utile que la nouvelle mandature se saisisse de ce sujet pour évaluer les besoins, et étudier la stratégie envisagée aujourd'hui sur ces aspects afin de s'assurer que l'institut puisse contribuer aux analyses de données à la hauteur de ses engagements techniques.

---

## VII. Projets qu'il nous semble important de commencer à examiner rapidement

---

Les sujets suivants n'ont pas été abordés durant les années précédentes. Il nous semble cependant que la nouvelle mandature devrait commencer leur examen pour permettre l'organisation rapide et optimale de la participation de l'institut le cas échéant.

### **A. Le « Future Circular Collider » (FCC)**

Les deux premières années de la mandature du Conseil ont coïncidé avec la mise à jour de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules (2018-2020). Les initiatives prioritaires pour le futur de la physique des hautes énergies dans le domaine des développements des collisionneurs étaient alors clairement exposées dès le début de l'année 2020 :

*« La prochaine priorité pour ce qui concerne les collisionneurs est une usine à Higgs électron-positon. À plus long terme, la communauté de la physique des particules en Europe a l'ambition de faire fonctionner un collisionneur proton-proton à la plus haute énergie atteignable. »*

En 2021, et en accord avec cette nouvelle stratégie, le Conseil du CERN engageait une étude de faisabilité technique et financière du projet FCC ("Future Circular Colliders"), étude financée à hauteur de 200 MCHF sur cinq ans (2021-2025) :

*« L'Europe, avec ses partenaires internationaux, devra étudier la faisabilité technique et financière d'un futur collisionneur de hadrons d'une énergie d'au moins 100 TeV dans le centre de masse au CERN, avec,*

*comme première phase éventuelle, la construction d'une usine à Higgs et de production électrofaible sous la forme d'une machine électron-positon. L'étude de faisabilité des collisionneurs et de l'infrastructure correspondante devra être mise en œuvre en tant que projet d'envergure mondiale, et être réalisée suivant le calendrier de la prochaine mise à jour de la stratégie. »*

Le CSI a passé en revue les activités de l'IN2P3 sur la R&D accélérateur pour les futurs collisionneurs de particules (FCC-NPC) lors de sa session des 9 et 10 février 2021. Une implication modeste de l'IN2P3 sur le FCC a été notée, utilisant de manière stratégique et synergétique les travaux antérieurs et les compétences préexistantes des équipes engagées sur les collisionneurs linéaires. Au vu de l'évolution de la situation (décrite ci-dessous) il serait judicieux de réexaminer rapidement les priorités et le niveau d'engagement de l'IN2P3 sur l'étude de faisabilité, puis les études pré-conception techniques du collisionneur électron-positon du FCC.

L'examen à mi-parcours de l'étude de faisabilité du projet FCC, par le "Scientific Policy Committee" (SPC) et le "Finance Committee" (FC) du Conseil du CERN, s'est déroulé du 11 au 13 novembre 2023. Les conclusions de cette revue, entérinée par le Conseil le 2 février 2024, semblent faire apparaître un consensus vers une augmentation substantielle des ressources financières et humaines dédiées au projet FCC. En parallèle, les recommandations du comité P5 aux États-Unis ont été rendues publiques au début du mois de décembre 2023. Ces recommandations soutiennent fortement le FCC comme la prochaine usine à Higgs, et ouvrent la porte à un investissement humain et financier substantiel dans le projet – en fonction des décisions prises en Europe.

Il est à noter que la présidence de la République Française prend le projet très au sérieux avec, en novembre 2023, une visite constructive du président Macron au CERN (en compagnie du président du second état hôte, la Confédération Suisse) ainsi que la création d'un comité interministériel ad-hoc pour juger de la participation française au projet FCC. Ce comité s'est déjà réuni avec les directions de l'IN2P3 et du CEA à la fin de l'année 2023, et il restituera une première analyse au début de l'année 2024.

Le calendrier actuel pour la première étape du FCC (FCC-ee) prévoit un démarrage au cours de la deuxième moitié de la décennie 2040-2050. Ce calendrier ne pourra être respecté que si les travaux de génie civil pour la construction du tunnel de 91 km commencent en 2033, ce qui nécessite une approbation du projet par le Conseil du CERN immédiatement après la prochaine mise à jour de la stratégie européenne (prévue en 2026-2027), c'est-à-dire en 2028. Cependant, la qualité du rapport d'étape pour la faisabilité du FCC, d'une part, et la pression imposée par le calendrier du contre-projet chinois, d'autre part, pourraient justifier une accélération du calendrier européen. La réunion du Conseil du CERN au mois de mars 2024 permettra de définir les étapes suivantes plus précisément.

Compte tenu de l'évolution rapide de la situation et des implications financières de ce projet, la nouvelle équipe devra examiner en détail, suffisamment tôt, et probablement assez régulièrement au cours de la mandature, les différentes propositions de participation de l'institut. Si la direction de l'institut décide de préparer au mieux cette participation, l'IN2P3 devra s'engager pleinement tant au niveau de la R&D accélérateur qu'au niveau de la physique des particules (R&D et conception des détecteurs, interface machine-détecteur, polarisation, logiciel et calcul, physique, proto-collaborations). Cela impliquera de s'assurer que les ressources humaines et financières soient bien adaptées à la réalisation des objectifs à court, moyen, et long terme du plus important projet de la physique des particules au niveau mondial.

L'objectif sera alors d'élargir progressivement, au cours des cinq années qui viennent, la communauté de physiciens expérimentateurs impliqués dans les études de physique et dans le développement et l'optimisation de concepts de détecteurs (trajectomètres, détecteurs de vertex, calorimètres, luminomètres, etc.) capable de répondre aux promesses du FCC-ee en termes de précision et de sensibilité. La luminosité du FCC-ee, en particulier au pôle du Z où les précisions statistiques sur de nombreuses observables électrofaibles pourra atteindre des valeurs relatives de l'ordre de  $10^{-5}$ , voire  $10^{-6}$ , nécessite des idées créatives et des méthodes innovantes tant au niveau des détecteurs qu'à celui de l'analyse de données. La prochaine mise à jour de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules, dont le calendrier accéléré est en délibération au Conseil du CERN, sera l'occasion de prendre date avec de nombreuses

soumissions d'Expressions d'Intérêt (Eoi) pour telle ou telle technologie de détecteurs, satisfaisant les critères et appuyant le potentiel de physique du FCC-ee.

## **B. Autres futurs accélérateurs**

Le rapport de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules et celui du comité P5 aux USA ont tous deux mis l'accent sur la nécessité de plus grands investissements dans le développement des accélérateurs. Ceci inclut les accélérateurs de protons de haute puissance, pouvant servir de sources de faisceaux secondaires de haute intensité, les accélérateurs linéaires d'électrons ou positons à fort gradient d'accélération, les technologies de récupération d'énergie, ainsi que les accélérateurs de muons.

À long terme, ces développements pourraient être exploités dans la perspective de collisionneurs  $e^+e^-$  linéaires avec une énergie dans le centre de masse de plusieurs TeV et de collisionneurs à muons pouvant atteindre la dizaine de TeV. Outre leur faisabilité, la complémentarité de ces derniers avec le FCC-hh de 100 TeV pour les phénomènes à très haute énergie (au-delà de 10 TeV) devra être étudiée en profondeur. Pour les électrons, les techniques d'accélération laser plasma ont donné lieu à la création d'un groupe de travail dans le cadre de la mise en place de la Stratégie Européenne : le très bon positionnement des groupes français dans cette thématique dynamique et la faisabilité de son application aux collisionneurs de haute luminosité méritent un suivi attentif.

Le Conseil a examiné une partie de ces sujets durant sa session de février 2021, et il serait judicieux de réévaluer les priorités dans ce domaine d'ici un an ou deux.

## **C. Astronomie Gamma au MeV**

À l'heure des développements spectaculaires de l'astronomie multi-messagers et multi-longueurs d'onde, le besoin d'un nouveau satellite d'astronomie gamma au MeV apparaît nécessaire pour couvrir une fenêtre en énergie aujourd'hui pratiquement inexplorée. Un tel instrument permettrait de contribuer significativement aux connaissances sur l'origine des ondes gravitationnelles et des neutrinos cosmiques, sur la physique du rayonnement cosmique et son impact sur les écosystèmes galactiques, ainsi que sur l'origine et l'évolution des éléments dans l'Univers. La communauté internationale d'astronomie gamma s'accorde sur le fait que le prochain grand instrument spatial devrait être un télescope utilisant l'effet Compton ou la création de paires électron-positon, couvrant plus de trois ordres de grandeur en énergie (d'environ 100 keV à plus de 100 MeV). Plusieurs projets, dont ASTROGAM proposé pour l'appel M5 de l'ESA, ont été ou sont en cours de discussion. Une revue des activités et des projets autour de cette thématique serait judicieuse afin de préparer au mieux le positionnement de l'IN2P3 dans un domaine où les équipes françaises ont déjà une excellente visibilité scientifique.

## **D. Astronomie gamma TeV-PeV**

La détection de rayons gamma à ultra haute énergie (au dessus de 100 TeV) par le détecteur à grand champ de vue LHAASO a ouvert une nouvelle ère dans l'astronomie des rayons gamma, en démontrant que des PeVatrons (source capable d'accélérer des électrons ou des hadrons aux énergies du PeV) existaient dans notre Galaxie. Les détecteurs à grand champ de vue tels que LHAASO sont complémentaires des instruments plus précis tels que les télescopes "Imaging Air Cherenkov" (IACT) comme CTA car ils sont capables de surveiller en continu tout le ciel, et d'explorer la région à ultra haute énergie, au prix d'une résolution angulaire et énergétique moins bonnes. Des projets, tels que SWGO, visant à compléter la couverture du ciel avec un détecteur à grand champ de vue dans l'hémisphère Sud, ont démarré depuis quelques années. Une partie de la communauté française des rayons gamma commence à s'intéresser à ces télescopes. Compte tenu du fort potentiel de découverte démontré par LHAASO et de la complémentarité avec CTA, dans lequel la communauté française des rayons gamma est fortement impliquée, un panorama des activités liées aux détecteurs à grand champ de vue serait approprié pour comprendre la potentialité d'une éventuelle implication formelle dans ces projets.

## E. La Physique des neutrinos au delà de 2030

Une fois que les expériences de précision actuellement en construction (DUNE, HK, JUNO, KM3NET) auront livré leurs résultats, vers l'année 2035, se pose légitimement la question de l'avenir de la physique des neutrinos, notamment en France. La violation de CP dans le secteur leptonique aura été mesurée et les paramètres d'oscillation seront tous connus avec une précision de l'ordre du pour mille, à l'exception de  $\theta_{13}$ . La mesure de la masse du neutrino sera en cours, même si pour l'instant aucune équipe de l'IN2P3 ne participe à ces programmes. D'ici là, selon l'ordre des masses qui aura été découvert, les expériences de double bêta avanceront sur la caractérisation de la nature du neutrino.

Cependant, quelques questions demeurent ouvertes ou nécessitent des mesures approfondies. Tout d'abord, l'amélioration la compréhension de la forme de la matrice PMNS, donc de la précision sur  $\theta_{13}$  (terme le plus petit) est nécessaire pour mieux définir le paramètre de Jarlskog quantifiant la violation de CP dans le secteur des neutrinos et améliorer la précision sur l'octant de  $\theta_{23}$ , incertitude dominante. La recherche de nouvelle physique dans le secteur leptonique pourrait se faire à travers la question de l'unitarité de la matrice PMNS à trois saveurs qui n'a pas encore été testée avec une précision significative. Des tests d'invariance CPT peuvent également être envisagés avec les neutrinos ainsi que la recherche de manifestations d'interactions non-standards, puisque le neutrino reste potentiellement sensible à une physique différente des autres particules du modèle standard. Nous encourageons le Conseil scientifique à examiner les nouvelles expériences qui viseront à répondre à ces questions, si des équipes de l'IN2P3 y participent. On peut déjà noter le projet SuperChooz et son expérience précurseure CLOUD à Chooz, qui a débuté en 2023.

La nouvelle expérience CLOUD ("Chooz LiquidO Ultraneur Detector") soutenue par la collaboration internationale éponyme (19 institutions académiques, dont EDF, dans 11 pays), s'appuie sur la technologie LiquidO avec un détecteur d'environ 10 tonnes. Il sera construit d'ici 2026 sur le nouveau site « ultra-proche » de Chooz, situé à environ 30 mètres de l'un des deux réacteurs nucléaires avec une surcharge minimale ( $\leq 5$ m). Le détecteur est financé à travers l'EIC européenne & l'UKRI britannique basé sur l'innovation (projet « AntiMatter-OTech ») qui vise à développer une surveillance non intrusive des réacteurs industriels. Des objectifs ambitieux de performances sont visés (10 000 interactions d'antineutrinos par jour, un rapport signal/bruit attendu  $\geq 100$ ) qui ouvriraient la voie à un programme de physique fondamentale utilisant les neutrinos des réacteurs ainsi qu'un démonstrateur de détection des neutrinos solaires dans une deuxième phase (encore en définition), appelé CLOUD-II.

Le projet CLOUD fait partie d'un effort plus grand qui a démarré en septembre 2022 lors de la signature entre le CNRS et EDF d'un accord de coopération, lançant officiellement la période du « SuperChooz Pathfinder » pour aborder l'évaluation de la faisabilité technique du projet d'ici 2028-2030. Le programme de physique de SuperChooz vise à fournir certaines des mesures uniques des oscillations des neutrinos les plus précises au monde ( $\theta_{13}$ ,  $\theta_{12}$ ,  $\Delta m^2_{13}$ ,  $\Delta m^2_{12}$ ) et ambitionne de sonder également quelques-unes des symétries fondamentales du Modèle Standard, comme la violation effective d'unitarité ou la violation de la symétrie CPT. L'expérience CLOUD est le premier jalon de cette voie exploratoire. Le programme de SuperChooz est conçu dans la complémentarité et synergie avec les grands programmes de la physique de neutrino de la décennie comme JUNO, HK et DUNE.

---

## VIII. Sujets transverses que nous recommandons d'examiner

---

### A. Modification du périmètre de la section 01

La direction du CNRS envisage de découper la section 01 en deux sections, provisoirement appelées 1.1 et 1.2, suivant un découpage thématique qui reste à affiner. La proposition de découpage est présentée comme suit :

1.1 Théorie et expérimentation en physique des particules et astroparticules, cosmologie, instrumentation innovante, technologies numériques :

- Physique des particules élémentaires : quarks, leptons chargés, neutrinos

- Chromodynamique quantique, interactions électrofaible et gravitationnelle
- Physique cosmologique : rayonnement fossile et énergie noire
- Astroparticules, neutrinos atmosphériques et cosmiques, ondes gravitationnelles
- Détecteurs de particules et instrumentation innovante
- Traitement massif des données

1.2 Théorie et expérimentation en physique et astrophysique nucléaire, désintégration bêta et recherche de matière noire, physique des accélérateurs, nucléaire dans l'énergie, en environnement et en santé

- Structure et dynamique nucléaires et hadroniques, nucléosynthèse
- Interactions fortes et faibles et symétries fondamentales
- Détection directe de matière noire, recherche d'événements rares
- Accélérateurs de particules et instrumentation innovante
- Applications en énergie, environnement et médicales

Nous avons identifié un certain nombre de désavantages et de dangers potentiels à un tel découpage, et quelques exemples sont donnés ci-dessous. Nous avons conscience que le découpage de la section 01 ne peut pas se faire sans difficulté. Si un tel découpage doit absolument se faire - ce qui reste à démontrer - il est important d'en identifier et d'en minimiser les conséquences collatérales. Nous espérons que ces commentaires éclaireront la nouvelle équipe du Conseil, et le Conseil scientifique du CNRS.

Il semble tout d'abord difficile de comprendre la distinction faite entre "Chromodynamique quantique, interactions électrofaibles" (1.1), et "Interactions fortes et faibles" (1.2), puisque les deux nouvelles sections sont supposées regrouper pour chaque liste la théorie et l'expérimentation.

Nous notons par ailleurs que la proposition de section 1.1 inclut pour le moment, entre autres, la physique des particules élémentaires ainsi que les détecteurs de particules et l'instrumentation innovante, et la proposition de section 1.2 inclut en particulier les interactions fortes et faibles et les symétries fondamentales, ainsi que les accélérateurs de particules et l'instrumentation innovante associée.

La physique des particules élémentaires, par l'intermédiaire de son modèle standard, est entièrement basée sur les interactions fortes et faibles des quarks et des leptons, et les extensions du modèle standard que les détecteurs de particules essaient de mettre en évidence sont en général basées sur les symétries fondamentales de la Nature. Une séparation de la physique des particules élémentaires (quarks et leptons) et des interactions de jauge régissant la dynamique de ces quarks et leptons – en somme, une séparation des fermions et des bosons – serait donc non seulement artificielle, mais contreproductive.

Encore plus frappant et sans doute encore plus dangereux pour le futur de la discipline, la physique des accélérateurs de particules et la physique des particules tombent chacune d'un côté différent du découpage proposé. L'expérience passée a montré à de multiples reprises que les avancées en physique des particules sont associées à de nouveaux accélérateurs qui ont souvent été conceptualisés par des physiciens des particules, aidés par des spécialistes de physique des accélérateurs qui par la suite prenaient en main le projet. On pense à Burt Richter et les collisionneurs électrons-positons (SPEAR, LEP, SLC), Carlo Rubbia et le collisionneur SpS au CERN, Bjorn Wiik pour HERA (et TESLA/ILC), Bob Palmer pour les collisionneurs à muons, Pier Odone pour les usines à B asymétriques, et plus récemment, quelques physiciens des expériences LEP pour LEP3 et TLEP, qui ont ensuite donné naissance au projet FCC.

Pour résumer, les études pour les accélérateurs du futur ne sont efficaces et fertiles que si elles sont portées par l'ensemble de la population de la physique des particules : théoriciens, expérimentateurs, spécialistes des techniques de détection, et bien sûr, physiciens des accélérateurs. La collaboration entre ces différentes populations ne s'arrête pas aux concepts : les études de l'interface détecteur-machine, ou la mesure précise de l'énergie de collision, sont organiquement des groupes mixtes, engagés à la réalisation d'un même but. Même le programme de physique d'un collisionneur ne peut être optimisé que s'il existe une communauté d'intérêt, de langage, et de compréhension fondamentale.

Plus généralement, force est de constater que le paysage de la physique des particules a été profondément modifié après dix ans d'opération du LHC, avec la découverte du boson de Higgs et l'absence

de nouvelles particules entre l'échelle électrofaible et quelques TeV. Ces observations conduisent à repenser en profondeur – tant expérimentalement que théoriquement – toute la physique associée à l'abondance de la matière par rapport à l'antimatière, à la masse des neutrinos, ou à la nature de la matière noire, qui nécessite des explications au-delà du modèle standard. La mise à mal du paradigme de « Weakly Interacting Massive Particle » (WIMP), par exemple, ouvre le champ des possibles sur une plage de masse (du meV au ZeV) et un éventail de couplages (de 1 à  $10^{-12}$  voire moins) très larges, nécessitant un travail d'exploration cohérent de toute la communauté, et englobant la recherche de matière noire, la recherche d'événements rares, et la physique des neutrinos, sur accélérateur et hors accélérateur.

Ces différentes thématiques sont dispersées dans la proposition actuelle, à un moment où il serait essentiel d'avancer ensemble en suivant un programme de recherche global : les chercheurs de matière noire de manière directe, de désintégrations double bêta sans neutrinos ou de désintégration du proton – hors accélérateur donc – se retrouveraient dans la section 1.2 avec des physiciens des accélérateurs. Ils suivraient donc des schémas d'évaluation différents de ceux qui font des recherches thématiques similaires sur accélérateurs (collisionneurs, faisceaux de neutrinos), alors même qu'ils participent souvent à la même grande conférence internationale bisannuelle, et qu'ils utilisent parfois les mêmes détecteurs. Au niveau technologique, la séparation entre ces recherches hors accélérateur et l'instrumentation innovante, compte tenu des développements en cours sur les détecteurs associés au sein des équipes de l'institut, ne semble pas être optimale non plus.

En ce qui concerne le domaine communément appelé aujourd'hui "physique hadronique", qui semble appartenir dans la proposition à la section 1.2, elle partage des outils (à la fois expérimentaux et théoriques) avec la physique des particules. Par exemple, les grosses collaborations de physique hadronique telles qu'ALICE et LHCb et dans une moindre mesure les expériences de physique hadronique à Jlab et GSI, ont des méthodes expérimentales (détecteurs, analyses) et des modes de fonctionnement (publications, groupes de travail...) très similaires à la physique des particules et très différents de ceux de la physique nucléaire. D'un autre côté, une séparation entre physique hadronique et physique nucléaire n'est pas non plus souhaitable. Par exemple, l'étude de la structure des hadrons dans les noyaux, les effets de matière nucléaire froide, l'étude de l'équation d'état de la matière nucléaire sont autant de sujets qui concernent à la fois la physique nucléaire et la physique hadronique.

La structure nucléaire, les taux de désintégrations et les réactions nucléaires sont à la base de l'origine des éléments produits lors des fusions d'étoiles à neutrons et de l'évolution stellaire. L'astrophysique nucléaire a de ce fait des liens très étroits avec le domaine de la cosmologie et des astroparticules. De plus, dans la nouvelle ère de l'astronomie multi-messagers, une approche intégrée est essentielle pour contraindre la composition, la structure et la dynamique des étoiles à neutrons (parmi d'autres objets astrophysiques). Par conséquent, une séparation de la physique (ou l'astrophysique) nucléaire des autres disciplines avec lesquelles elle est étroitement liée serait contre-productive pour tous les domaines.

Il nous semble enfin que séparer "Détecteurs de particules et instrumentation innovante" des applications (notamment médicales et environnementales), ainsi que de la détection directe de matière noire est contre productif compte tenu de l'intrication entre ces sujets et les techniques innovantes de détection, et du fait que de nombreuses personnes à l'IN2P3 travaillent simultanément sur ces aspects instrumentaux et scientifiques.

Pour conclure, séparer les expertises sur l'ensemble des sujets évoqués plus haut au sein de la section rendrait plus difficile la sélection de candidats à l'interface entre les différents sujets, et deviendrait mécaniquement un frein à l'embauche de chercheurs à compétences multiples, pourtant essentiels, voire précieux, dans nos domaines où la spécialisation a tendance à se généraliser bien que l'interdisciplinarité y soit fortement encouragée.

### **Avis et recommandations**

L'argument évoqué pour ce nouveau découpage est la taille conséquente de l'actuelle section 01, qui pose problème compte tenu du nombre important de dossiers à traiter pour le recrutement et l'évaluation

des scientifiques. Il convient en effet de ne pas perdre de vue que ce sont là les deux missions principales des sections du Comité national, et celles qui leur demandent le plus de travail. Le pilotage scientifique étant à la charge de la direction de l'institut, elle devra s'assurer de la cohérence scientifique entre les travaux des deux sections, l'équilibre relatif des postes ouverts dans les deux sections et entre les différentes composantes de chaque section. Même si une telle organisation est en principe possible, elle semble présenter différentes difficultés et un certain nombre de dangers pour notre communauté. Deux aspects, liés l'un à l'organisation et l'autre à l'expertise, méritent une attention particulière :

- Les thématiques sont très imbriquées au niveau des laboratoires, et parfois même au sein des équipes, ce qui créerait des difficultés d'organisation du travail des deux sections. Les rapports de prospectives, visites des laboratoires (tourniquets), avis sur les changements de direction d'unité, l'établissement de GDR ou d'écoles, sont en général des questions transversales, qui nécessiteraient l'avis des deux sections. Il serait alors nécessaire de mettre en place un mode de fonctionnement particulier pour satisfaire cela, et il n'est pas clair que la charge de travail des sections s'en trouve allégée.
- Le découpage envisagé présente un problème de champ d'expertise plus aigu encore. En effet, l'importance de certaines thématiques transversales mentionnées plus haut ne présage pas d'une diminution drastique du travail de chaque section, puisque nombre de candidatures se dédoubleraient mécaniquement (comme c'est déjà observé entre la section 01 et la section 17, la section 01 et la section 02,...). Dans ce cas, une partie de l'expertise nécessaire à l'évaluation des candidats risquerait de manquer, de façon symétrique dans chaque section, conduisant à négliger les candidatures aux profils les plus interdisciplinaires. Pour les mêmes raisons, l'examen du travail des personnels de la recherche risque de ne pas s'en retrouver simplifié. Bon nombre de collègues ne sauraient d'ailleurs pas à laquelle des deux sections ils ou elles correspondent le mieux, et en principe pourraient même demander un double rattachement.

Au moment où la première étape du projet FCC (FCC-ee) est sur le seuil de devenir un projet concret, il nous semble maladroit et contre-productif de couper la communauté entre les expérimentateurs et les spécialistes des techniques de détection, d'une part, et les théoriciens et les physiciens des accélérateurs d'autre part (ou toute autre combinaison de ces expertises). Il est fondamental que cette communauté reste profondément liée : les physiciens des particules apportent les idées, les besoins, les défis, mais aussi le succès et la visibilité à tout projet d'accélérateur (ou de jouvence d'accélérateur), et travaillent presque toujours de concert avec les physiciens d'accélérateurs qui réalisent ces projets.

De même, il nous paraît inopportun de séparer les recherches sur accélérateur et hors accélérateur, au moment où – en l'absence d'orientation théorique précise – une cohérence de la communauté dans sa globalité et du programme de recherche pour la physique au-delà du modèle standard est indispensable, et où l'union de toutes les expertises est une des clefs vers la réussite.

Finalement, séparer les thématiques plutôt interdisciplinaires et les thématiques plutôt fondamentales risquerait fortement d'entraîner un manque de cohésion entre les expertises scientifiques des nouveaux entrants, réduisant encore davantage les interactions des chercheur(se)s dans les laboratoires de l'institut.

Il nous apparaît donc nécessaire et urgent que la proposition de découpage de la section 01 soit, en effet, discutée, revisitée et affinée, en prenant en compte ces remarques essentielles. Nous savons que le nouveau Conseil scientifique de l'IN2P3 s'est déjà emparé du sujet, et nous ne doutons pas qu'il communiquera rapidement ses conclusions à la direction de l'IN2P3 et du CNRS.

## **B. L'adaptation bas carbone des activités à l'IN2P3**

Depuis les années 1970 au moins, les scientifiques notamment au CNRS ont étudié l'impact de l'activité humaine sur l'environnement, et mis en garde contre ses effets néfastes. Le document du CS du CNRS sur la recherche et le climat de 2023 [2] (auquel le CS IN2P3 a participé), a ainsi établi un état des lieux des approches traitant de la question climatique dans les Instituts du CNRS, mettant en avant les travaux de modélisation de l'impact du changement climatique, de sa prise en compte par la société, dans le but de le limiter et d'agir afin de préserver la biodiversité. Ces dernières années, la question de la prise en compte de l'impact de l'activité scientifique en elle-même sur le climat a récemment gagné de l'importance, en soulevant

le problème de la responsabilité des scientifiques vis-à-vis des choix de société à faire pour définir une trajectoire soutenable par rapport au changement climatique. Mandaté par la direction du CNRS, le Comité d'éthique du CNRS (COMETS) demande d'intégrer explicitement les enjeux climatiques à la pratique de la recherche [3]. Il recommande notamment la réduction de l'empreinte écologique de la recherche, et suggère de plus à la communauté de s'interroger sur les risques liés à l'impact de travaux de grande envergure ou utilisant de grands équipements sur l'environnement, quel que soit le domaine.

Le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) a émis en 2023 un document [4] demandant aux établissements tels que le CNRS de mettre en place un schéma directeur « Développement durable, responsabilité sociétale et environnementale » (SD DD&RSE). Il s'agit d'établir un plan se déclinant selon trois objectifs : décarbonation, sobriété, impact sur la biodiversité ; tout d'abord en quantifiant les émissions en équivalent CO<sub>2</sub>, puis en proposant des indicateurs et des cibles pour atteindre les objectifs de 5% de réduction des émissions par an fixés au niveau national. Un comité « développement durable » a été mis en place au CNRS dès 2020, qui pilote le plan de transition bas carbone du CNRS avec quatre thématiques prioritaires : achats, numérique, mobilité et énergie. Ce comité encourage les laboratoires à évaluer leurs émissions en utilisant le logiciel créé par le collectif Labos 1point5 [5], collectif existant depuis 2019 et labellisé GdR depuis 2021. Dans ce cadre, le collectif Labos 1point5 réalise un bilan des gaz à effet de serre au CNRS. Ses études montrent que les achats sont le plus gros poste d'émission d'équivalent CO<sub>2</sub> (74%) dans les laboratoires du CNRS. A l'échelle de l'IN2P3, des référents « développement durable » ont été mis en place récemment dans les laboratoires. L'ensemble des référents forme la Cellule développement durable de l'IN2P3. Depuis 2023, l'organigramme de l'Institut [6] comporte aussi un délégué scientifique au développement durable (S. Calvet). Des discussions ont lieu avec les autres Instituts du CNRS, au sein du Comité développement durable du CNRS.

Au-delà de la réduction de l'empreinte écologique demandée aux établissements publics et nécessaire à la trajectoire vers un fonctionnement durable, les disciplines couvertes par l'IN2P3 sont particulièrement concernées par ces questions. A l'heure actuelle, la pratique de la recherche à l'Institut nécessite la construction et l'opération de grands équipements (notamment les collisionneurs et détecteurs de particules, télescopes et satellites), qui sont des activités très émettrices. Les émissions commencent à être évaluées pour les grands équipements et les laboratoires qui les accueillent, dans les domaines de la physique des particules [7] ou bien des astroparticules et cosmologie [8]. En particulier, le CERN s'est saisi de la question, avec la remise de trois rapports [9] évaluant son impact sur l'environnement, et aboutissant à la conclusion que la plupart de ses émissions sont liées aux gaz fluorés dans les détecteurs (il est à noter que jusqu'au dernier rapport, le CERN n'incluait pas encore les achats dans son bilan) et que les prochains détecteurs devront utiliser des gaz sans impact sur l'environnement - tels que l'argon, le butane, l'hélium, le néon, ou le krypton.

## **Avis et recommandations**

Nous observons avec satisfaction le fait qu'une structuration soit en cours au niveau du CNRS et des Instituts avec différents comités et des référents laboratoires, qui s'inscrivent dans la démarche du GdR Labos 1point5 et évaluent localement les émissions de gaz à effet de serre dans les unités. L'établissement d'un plan chiffré au niveau du CNRS pour diminuer les émissions devrait être la prochaine étape, afin de parvenir à la trajectoire de -5% par an fixée au niveau national. Il nous semble opportun de recommander à la direction de veiller à ce que ces objectifs de réduction des gaz à effet de serre soient fixés avec les laboratoires, et de mener une réflexion, accompagnée par la cellule de développement durable de l'IN2P3, pour pouvoir établir un plan permettant de diminuer en particulier l'empreinte CO<sub>2</sub> due aux achats, puisqu'il s'agit du premier poste d'émissions de carbone. Sur la question des voyages en avion, même s'il ne s'agit pas du plus gros poste d'émission, nous serions favorables aux conférences à distance et multi-sites, et encourageons la nouvelle équipe de veiller à ce que ces nouvelles pratiques ne nuisent pas à la carrière des chercheurs ni à la vitalité de la recherche effectuée. Les rencontres en présentiel entre chercheurs sont en effet importantes, il faudra donc veiller à ne pas interdire mais plutôt à réduire en sélectionnant de façon rationnelle les conférences ainsi que les voyages strictement nécessaires dans le cadre des collaborations internationales.

Des discussions ont démarré, qui semblent nécessaires pour tout d'abord évaluer d'une manière cohérente les émissions en carbone des grands équipements et de leur laboratoire ou observatoire hôte, puis pour décider comment attribuer ces empreintes aux personnels, laboratoires, projets, ou encore comment les rapporter à la production scientifique. Le Conseil recommande à la direction et à la cellule environnement durable de mener une réflexion par rapport à la façon dont est calculée l'empreinte carbone : par exemple, inclure l'empreinte du CERN dans le calcul de l'empreinte des personnels des laboratoires peut sembler une bonne idée en interne pour contribuer à une prise de conscience de l'impact de nos disciplines sur l'environnement, mais une telle approche n'est pertinente que si on rappelle que les résultats de la recherche apportée par nos disciplines constituent un bien commun et peuvent directement ou indirectement bénéficier à la société, et qu'ils sont en tout cas à rapporter à l'ensemble des personnes qui utilisent ces résultats. Cette piste amène à envisager la possible prise en compte de l'empreinte carbone des nouveaux projets lors de leur examen au Conseil. Nous suggérons ainsi au Conseil de demander aux équipes des informations sur ces aspects, et de les prendre en compte d'une manière qui reste à définir (l'idée étant avant tout de susciter la discussion), mais qui sera bien entendu à pondérer par l'impact scientifique anticipé des projets et aussi leur coût en termes de ressources financières et humaines.

L'avis du COMETS, demandant de se poser des questions sur l'usage de grands équipements à cause de leur effet néfaste sur l'environnement, a le mérite de soulever un point délicat. Si la mission de l'IN2P3 est de faire progresser les connaissances dans ses disciplines, est-il possible d'envisager ces recherches sans de très grands instruments ? Des réflexions ont lieu dans ce sens : citons par exemple l'accélération laser plasma pour diminuer la taille des accélérateurs de particules grâce à leur fort gradient. Cependant, force est de constater que pour l'instant les disciplines de l'IN2P3 ne peuvent se passer de ces instruments, qui sont au cœur des recherches de l'Institut, et qui permettent de répondre aux questions fondamentales sur l'infiniment petit et l'infiniment grand. Dès lors, des réflexions sur la nécessité de toutes les émissions en carbone, et sur la possibilité de les réduire ou de les compenser sont nécessaires. Il est important de noter que des réflexions sont déjà en cours, par exemple au CERN, avec des actions engagées pour réduire l'empreinte carbone, particulièrement sur la question de l'usage des gaz fluorés qui forment la majeure partie des émissions du CERN. Nous soutenons cette initiative et recommandons de rechercher des alternatives aux gaz fluorés pour tous leurs usages dans nos laboratoires. Nous soutenons aussi, dans le domaine des astroparticules et de la cosmologie, la suggestion évoquée dans la communauté de mutualiser la construction de grands instruments plutôt que de promouvoir une compétition entre projets ayant le même but scientifique, multipliant de fait les émissions. L'impact du stockage, transfert et traitement des données ne doit pas non plus être négligé, les plans de gestion des données pourraient donc à terme aussi être complétés par cette notion de coût carbone. Nous rappelons aussi que l'impact écologique de la recherche n'est évidemment pas uniquement lié à l'impact carbone, mais que nous avons choisi de nous focaliser sur ce point dans le présent rapport car il s'agit d'un sujet immédiat sur lequel des progrès importants pourraient être accomplis.

## **C. Les entraves administratives à la recherche à l'IN2P3 et au CNRS**

Malgré une volonté affichée par la direction du CNRS de simplifier les procédures, il est de notoriété publique que les personnels de la recherche perçoivent des contraintes administratives de plus en plus fortes et consacrent un temps et une énergie de plus en plus importants à des tâches autres que les travaux de recherche, à tel point que ce sujet est désormais récurrent dans la presse généraliste. Ces dernières années, la dématérialisation a été entreprise à plusieurs niveaux, avec la mise en place de portails tels que Ariane pour les interactions de type ressources humaines, le coffre-fort numérique, la gestion des temps par Agate-Tempo, la constitution des dossiers d'avancement par Quartz/e-valuation, et tout récemment la mise en place du système Etamine/Goelett/Notilus pour les missions. Ces systèmes, censés simplifier le travail des agents, ont pourtant produit un certain nombre d'effets pervers, avec notamment la perte de contact humain entre le personnel en demande et le personnel chargé de la gestion administrative, provoquant une charge de travail accrue pour les deux catégories d'agents. Plus grave encore, le système Etamine/Goelett/Notilus a été mis en place à l'échelle nationale, probablement sans avoir été suffisamment testé en amont, ce qui a conduit à de nombreux dysfonctionnements des services et des unités de recherche à la rentrée de septembre 2023. Bien que la situation se soit partiellement améliorée depuis, cette mise en place chaotique a servi de révélateur à un problème plus profond causé par l'accumulation de procédures inadaptées au

fonctionnement même de la recherche, la part croissante des tâches administratives demandées à tous les agents, et un sentiment de défiance généralisée ressenti par l'ensemble des personnels. Ce dernier culmine avec l'ensemble des pièces à fournir pour le remboursement des nuitées, repas et trajets, lors de missions aussi courantes qu'un aller-retour au CERN ou au siège du CNRS. A tout cela s'ajoute le fait qu'une part croissante des crédits alloués à la recherche le sont sur la base d'appel à projets, ce qui entraîne des procédures de candidatures, d'évaluation *a priori* et de contrôle *a posteriori*, qui réduisent d'autant le temps consacré par les personnels aux travaux de recherche. Bien qu'elle apporte une souplesse appréciable pour les projets de courte durée, la temporalité de ce type de financements est en revanche plutôt inadaptée pour un grand nombre de projets dans les disciplines couvertes à l'IN2P3. De même, si tous les personnels comprennent parfaitement qu'elles doivent exister, les règles générales d'achat de la fonction publique ne tiennent aucun compte des spécificités de nos domaines. Pour ne citer qu'un exemple, il est grandement contre-productif de devoir perdre du temps pour recevoir trois devis à mettre en concurrence, pour l'achat d'un équipement tellement spécifique que seule une compagnie au monde le propose. Y compris en ce qui concerne les crédits dits « récurrents », la durée effective de l'exercice comptable est fortement réduite par la lourdeur du système, avec des crédits disponibles effectivement pour la recherche en février ou mars, et un exercice comptable qui doit être clos (« service fait ») autour de la fin novembre, sans quoi ces crédits non reportables sont perdus pour les projets. Ajoutées aux délais d'introduction des nouveaux fournisseurs dans la base de données, ces contraintes engendrent un stress réel pour les personnels.

### **Avis et recommandations**

Nous recommandons à la direction de l'institut et à celle du CNRS de ne pas sous-estimer la problématique de ces « entraves administratives à la recherche » et nous les engageons à tout faire pour y apporter remède du point de vue institutionnel. Nous encourageons la prochaine mandature à s'emparer de ces problématiques à l'échelle de l'IN2P3, en concertation avec le Conseil scientifique du CNRS, afin de conseiller les deux directions sur les mesures qui seraient susceptibles d'améliorer la situation.

---

## Conclusion

---

Les activités des équipes de recherche de l'IN2P3 couvrent des domaines extrêmement variés, tels que les particules et interactions fondamentales, la physique et l'astrophysique nucléaires, la physique des astroparticules et la cosmologie. Certaines recherches plus technologiques sont aussi menées par ces équipes pour les développements d'accélérateurs ou de détecteurs de particules et le stockage, le traitement et l'analyse de grandes quantités de données. Des applications de ces travaux sont également développées à l'institut pour la médecine, la production d'énergie nucléaire, l'environnement ou l'imagerie de la Terre et des constructions.

Seule une partie de ces activités a pu être examinée lors de notre mandataire du Conseil scientifique de l'institut, dans la suite des travaux menés par la mandature précédente. L'ensemble des conclusions tirées des sessions du Conseil se trouvent dans les comptes rendus accessibles publiquement sur le site de l'IN2P3 et n'est pas rappelé ici.

En complément des grandes lignes tracées dans le rapport de prospective de l'institut, à la rédaction duquel notre Conseil a été associé et dont les conclusions ne sont pas non plus retranscrites ici, le présent rapport propose les principaux développements qu'il nous semble important d'examiner dans les quelques années qui viennent. Il évoque en outre deux questions plus générales, touchant aux procédures administratives et à la transition bas-carbone, qui nous semblent devoir être étudiées très prochainement, de par les répercussions qu'elles ont ou qu'elles auront sur les activités de recherche de l'ensemble de l'IN2P3.

---

## Annexe 1 : Liste des abréviations et acronymes

---

Seuls Les acronymes étrangers correspondant à des concepts, laboratoires ou institutions sont traduits

**AGATA** : Advanced GAMMA Tracking Array

**AIEA** : Agence Internationale de l'Énergie Atomique

**ALICE** : A Large Ion Collider Experiment

**ALTO** : Accélérateur Linéaire et Tandem d'Orsay

**AMS** : Alpha Magnetic Spectrometer

**APC** : Laboratoire AstroParticules et Cosmologie

**ApPEC** : Astroparticle Physics European Consortium : Consortium européen pour les astroparticules

**ARCA** : Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss

**ASTROGAM** : GAMMA-ray ASTROnomy space observatory

**ATLAS** : A Toroidal LHC Apparatus

**C2RMF** : Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France

**C3N** : Coordination des responsables des instances du Comité national du CNRS

**Caltech** : California Institute of Technology : Institut de technologie de Californie

**CCD** : Charge Coupled Device

**CC-IN2P3** : Centre de Calcul de l'IN2P3

**CEA** : Commissariat à l'Énergie Atomique

**CENBG** : Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan, désormais LP2i : Laboratoire de Physique des deux infinis

**CERN** : Centre Européen pour la Recherche Nucléaire

**CID** : Commission InterDisciplinaire

**CLOUD** : Chooz LiquidO Ultraneur Detector

**CMB** : Cosmological Microwave Background : Fond diffus cosmologique

**CMB-S4** : Cosmological Microwave Background Stage 4

**CMB-SO** : Cosmological Microwave Background at Simons Observatory

**CMS** : Compact Muon Solenoid

**CNES** : Centre National d'Études Spatiales

**CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique

**COMETS** : Comité d'éthique du CNRS

**CP** : Charge-Parité

**CPPM** : Centre de Physique des Particules de Marseille

**CPT** : (Laboratoire) Centre de Physique Théorique

**CPT** : (Symétries) Charge Parité Temps

**CS** : Conseil Scientifique

**CSI** : Conseil Scientifique d'Institut

**CTA** : Cherenkov Telescope Array

**CUORE** : Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

**CUPID** : CUORE Upgrade with Particle IDentification

**DAMIC** : DArk Matter In CCDs

**DARWIN** : DArk matter WImp search with liquid xenON

**DAS** : Directeur Adjoint Scientifique  
**DEN** : Direction de l'Énergie Nucléaire  
**DESI** : Dark Energy Spectroscopic Instrument  
**DESIR** : Désintégration, Excitation et Stockage d'Ions Radioactifs  
**DESY** : Deutsches Elektronen-Synchrotron : Synchrotron à électrons allemand  
**DoE** : Department of Energy : Département de l'énergie (USA)  
**DUNE** : Deep Underground Neutrino Experiment  
**EDF** : Électricité De France  
**EGO** : European Gravitational Observatory : Observatoire gravitationnel européen  
**EIC** : Electron Ion Collider : Collisionneur Electrons-ions  
**ENS-Mines** : École Nationale Supérieure des Mines  
**Eoi** : Expression of Interest : Expression d'intérêt  
**ePIC** : Electron-Proton/Ion Collider : Collisionneur électrons - protons/ions  
**ESA** : European Space Agency : Agence spatiale européenne  
**ESS** : European Spallation Source : Source de spallation européenne  
**ET** : Einstein Telescope  
**EUSO** : Extreme Universe Space Observatory  
**eV** : électron-volt  
**FAIR** : Facility for Antiproton and Ion Research : Installation de recherche à l'aide d'antiprotons et d'ions  
**FCC** : Future Circular Collider : Futur collisionneur circulaire  
**FCC-ee** : Future Circular Collider electron - positron  
**FCC-hh** : Future Circular Collider hadron - hadron  
**FCC-NPC** : Future Circular Collider - Next Particle Colliders  
**FTE** : Full Time Equivalent : Equivalent temps plein  
**GANIL** : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds  
**GdR** : Groupement de Recherches  
**GPU** : Graphics Processing Unit : Processeur graphique  
**GRIT** : Granularity, Resolution, Identification, Transparency  
**GSI** : Gesellschaft für Schwerionenforschung : Installation pour la recherche sur les ions lourds  
**GT** : Groupe de Travail  
**HEP** : High Energy Physics : Physique des hautes énergies  
**HERA** : Hadron–Elektron Ring Anlage : Installation pour un anneau électron-hadron  
**HK** : Hyper-Kamioka Nucleon Decay Experiment (Hyper-Kamiokande)  
**HL-LHC** : High Luminosity - Large Hadron Collider : Grand collisionneur de hadron à haute luminosité  
**HPC** : High Performance Computing : Calcul à haute performance  
**HSF** : HEP Software Foundation  
**IA** : Intelligence Artificielle  
**IAA** : Institut d'Astronomie et d'Astrophysique  
**IACT** : Imaging Air Čerenkov Telescope : Télescope Čerenkov à imagerie  
**IJCLab** : Laboratoire Irène Joliot-Curie  
**ILC** : International Linear Collider : Collisionneur linéaire international  
**INFN** : Istituto Nazionale di Fisica Nucleare : Institut National de physique nucléaire

**INSERM** : Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale  
**INSP** : Institut des NanoSciences de Paris  
**IN2P3** : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules  
**IRAM** : Institut de RadioAstronomie Millimétrique  
**IRCM**: Institut de Recherche en Cancérologie de Montpellier  
**IRFU** : Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers  
**IRIT** : Institut de Recherche en Informatique de Toulouse  
**ISOL** : Isotope Separation On Line : Séparation d'isotopes en ligne  
**JLab** : Jefferson Laboratory  
**JUNO** : Jiangmen Underground Neutrino Observatory  
**keV, MeV, GeV, TeV, PeV, EeV, ZeV** : kilo, méga, giga, téra, péta, éta, zetta électron-volts  
**KID** : Kinetic Inductance Detector  
**KM3NeT** : Cubic Kilometer Neutrino Telescope  
**KSP** : Key Science Project : Projet scientifique principal  
**LAPP** : Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules  
**LASER** : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation : Amplification de lumière par émission stimulée de radiations  
**LAT** : Large Aperture Telescope  
**LEGEND** : Large Enriched Germanium Experiment for Neutrinoless Double beta decay  
**LEP** : Large Electron Positron ring : Grand anneau électrons - positons  
**LHAASO** : Large High Altitude Air Shower Observatory  
**LHC** : Large Hadron Collider : Grand collisionneur de hadrons  
**LHCC** : Large Hadron Collider Committee  
**LINAC** : LINear ACcelerator : Accélérateur linéaire  
**LISA** : Laser Interferometer Space Antenna  
**LiteBIRD** : (Light) satellite for the study of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection  
**LLR** : Laboratoire Leprince-Ringuet  
**LNGS** : Laboratori Nazionali del Gran Sasso : Laboratoire national du Gran Sasso  
**LPNHE** : Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Énergies  
**LPPR** : Loi de Programmation Pluriannuelle de la Recherche  
**LSST** : Legacy Survey of Space and Time  
**M5** : 5th Medium-class mission (M5) launch opportunity of the Cosmic Vision Programme  
**MADMAX** : MAgnitized Disc and Mirror Axion eXperiment  
**MCHF** : Million de francs suisses  
**MESRI** : Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation  
**MIMAC** : Micro-tpc MAtrix of Chambers  
**ML4Jets** : Machine Learning for Jet Physics  
**MoU** : Memorandum of Understanding : Mémoire d'entente  
**MPI** : Max Planck Institute : Institut Max Planck  
**MYRRHA** : Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications  
**NEMO** : Neutrino Ettore Majorana Observatory

**nEXO** : next Enriched Xenon Observatory  
**NIKA** : New IRAM KID Array  
**NIMBE** : Nanosciences et Innovation pour les Matériaux, la Biomédecine et l'Énergie  
**ORCA** : Oscillation Research with Cosmics in the Abyss  
**P5** : Particle Physics Project Prioritization Panel  
**PARIS** : Photon Array for studies with Radioactive Ions and Stable beams  
**PIP-II** : Proton Improvement Plan-II  
**PMNS** : Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata  
**PSI** : Paul Scherrer Institut : Institut Paul Scherrer  
**QCD** : Quantum ChromoDynamics : Chromodynamique quantique  
**QUBIC** : Q-U Bolometric Interferometer for Cosmology  
**R&D** : Recherche et Développement  
**R2D2** : Rare Decays with Radial Detector  
**RF** : Radio-Fréquence  
**RHIC** : Relativistic Heavy Ion Collider : Collisionneur d'ions lourds relativistes  
**RIKEN** : Institute of Physical and Chemical Research : Institut de recherche en physique et chimie  
**S3-LEB** : S3 Low Energy Branch  
**SACM** : Service des Accélérateurs, de Cryogénie et de Magnétisme  
**SAT** : Small Aperture Telescope  
**SD DD&RSE** : Schéma Directeur « Développement Durable – Responsabilité Sociétale et Environnementale »  
**SFP** : Société Française de Physique  
**SK** : Super-Kamioka Nucleon Decay Experiment (Super-Kamiokande)  
**SLC** : Stanford Linear Collider  
**SO** : Simons Observatory  
**SPEAR** : Stanford Positron Electron Accelerating Ring  
**SPIRAL2** : Système de Production d'Ions RAdioactifs en Ligne de 2<sup>e</sup> génération  
**SppS** : Super proton antiproton Synchrotron  
**Subatech** : Laboratoire de physique SUBAtomique et des TECHnologies associées  
**SVOM** : Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor  
**SWG0** : Southern Wide-field Gamma-ray Observatory  
**T2K** : Tokai to Kamioka  
**TES** : Transition Edge Sensors  
**TESLA** : TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator  
**TESSERACT** : Transition Edge Sensors with Sub-eV Resolution And Cryogenic Targets  
**TLEP** : Triple Large Electron Positron ring  
**UKRI** : United Kingdom Research and Innovation  
**Univ.** : Université  
**WIMP** : Weakly Interacting Massive Particle : particule massive interagissant faiblement  
**WLCG** : Worldwide LHC Computing Grid : Grille de calcul mondiale du LHC  
**XFEL** : X-ray Free Electron Laser : Laser X à électrons libres  
 **$0\nu\beta\beta$**  : Désintégration double-bêta sans neutrino

---

## Annexe 2 : Indications pour les projets examinés par le Conseil scientifique de l'IN2P3

---

### Langues utilisées et indications générales

Le Conseil scientifique demande aux orateurs de fournir un document écrit UN MOIS avant la séance ouverte, de façon à pouvoir préparer au mieux l'évaluation du projet. Ce document sera utilisé pour la rédaction du compte-rendu, et sera communiqué aux rapporteurs (deux rapporteurs extérieurs par projet). Il est également important qu'une version raisonnablement aboutie du support visuel de la présentation soit transmise UNE SEMAINE avant la séance.

Le document écrit sera préférentiellement en anglais au cas où l'un(e) des rapporteur(e) extérieur(e) serait anglophone.

Par contre, pour que tout le monde (y compris certains IT, qui ne sont pas forcément anglophones) puisse suivre les présentations orales, nous préférons qu'elles soient formulées en français, avec le support visuel en anglais, ce qui permet à tout le monde d'y trouver son compte.

### Document écrit

Dans un format éventuellement libre (mais pourquoi pas s'en tenir à la table des matières proposée ?) ce document devra ABSOLUMENT contenir les informations suivantes. Il fera MAXIMUM 20 pages, mais des renvois vers des documents externes (lettres d'intention, design reports, sites web, etc.) permettront si besoin d'approfondir.

#### 1. Résumé (une page)

#### 2. Enjeux scientifiques

Quelle question scientifique le projet adresse-t-il ? Avant le projet lui-même, où en est la science dans le domaine concerné ? Comment en est-elle arrivée là ? Comment la communauté IN2P3 est mobilisée et dynamisée autour de ces enjeux scientifiques

(accès à un GdR ? IRN ?), et quels sont les liens avec les communautés connexes de recherche (Santé, INSU, INP, ...). Quelle visibilité les équipes IN2P3 impliquées dans le projet ont elles, ou vont elles avoir ? Comment cette visibilité pourrait-elle être accrue le cas échéant ? Préciser les rôles majeurs des agents IN2P3 (organigramme du projet).

#### 3. Projet

En quoi consiste exactement le projet, et comment il répond aux enjeux susmentionnés ? Quelles sont les productions scientifiques attendues (publications, brevets, thèses, réalisations, etc.) ?

#### 4. Genèse et calendrier

Comment / quand le projet est-il né ? Quelles sont les étapes franchies / à franchir ? Au niveau global (si applicable), mais surtout à l'IN2P3. Le cas échéant, rappeler d'éventuels passages devant des conseils scientifiques (IN2P3, labo, comité d'expériences, etc.) et leur conclusion. Quelles sont les productions scientifiques passées (publications, brevets, thèses, réalisations, etc.) ?

#### 5. État de l'art

Comment se positionne le projet vis-à-vis de l'éventuelle concurrence (nationale, européenne et internationale) en termes de calendrier et de performances ?

## 6. Ressources et moyens

Quelles sont les ressources techniques et humaines impliquées dans le projet, et leur évolution temporelle passée (si applicable) ? Détailler les besoins humains à court et moyen terme, en précisant si les ressources sont identifiées et/ou si elles nécessiteront un renforcement/élargissement. Pour un projet collaboratif, indiquer quelle fraction l'IN2P3 représente, en termes humains et financiers.

Ressources humaines : Lister les laboratoires impliqués à l'IN2P3, avec pour chacun, le nombre de physiciens permanents / non-permanents / ingénieurs impliqués, ainsi que l'équivalent FTE. Donner les noms, au moins des permanents, ainsi que la fraction de chacun dédiée au projet.

Ressources financières : Combien coûte le projet, globalement et à l'IN2P3 ? Quel budget est disponible ? Quelles sources de financement complémentaires sont envisagées ? Préciser les montants et les sources, ainsi que leur évolution temporelle. Un tableau année par année peut être judicieux.

## 7. Réalisations techniques

Quelles réalisations techniques sont envisagées, et comment seront-elles réalisées (interne, sous-traitance...) ? Préciser ici les besoins en personnel technique. Si des équipements spécifiques doivent être acquis, préciser leurs potentielles utilisations futures. Si le recours à des équipements mutualisés - plateforme.. - est envisagé, préciser si les demandes du projet sont compatibles avec le plan de charge de ces équipements. Si le projet s'assortit d'une phase de R&D, préciser quels en sont les enjeux et les éventuels verrous technologiques.

## 8. Auto-analyse SWOT (facultative)

Quelles sont les forces, faiblesses, opportunités et menaces qui pèsent sur le projet ? Analyse de risque et mitigation envisagée.

---

## Annexe 3 : liste des sessions de la mandature

---

- **18 janvier 2019**, siège du CNRS : Réunion d'installation (session fermée)
- **27 février 2019**, siège du CNRS : Préparation des travaux de la mandature (session fermée)
- **26-27 juin 2019**, siège du CNRS : Recherche en physique nucléaire avec des faisceaux d'ions accélérés
- **16 octobre 2019**, siège du CNRS : Préparation des prospectives de l'institut (session fermée)
- **25-26 février 2020**, siège du CNRS : Les plateformes d'irradiation labellisées
- **30 juin – 1<sup>er</sup> juillet 2020**, Visioconférence : Astroparticules et cosmologie : projets spatiaux à l'IN2P3
- **27-28 octobre 2020**, Visioconférence : Complémentarité sol-espace dans les recherches sur le CMB et les ondes gravitationnelles
- **9-10 février 2021**, Visioconférence : L'accélération et les développements d'accélérateurs
- **29-30 juin 2021**, Visioconférence : Théorie, incluant les thématiques nucléaire, particules (dont gravitation) et astroparticules
- **26-27 octobre 2021**, LPNHE (Paris) : Neutrinos
- **3-4 février 2022**, Visioconférence : La physique nucléaire pour l'énergie
- **23-24 juin 2022**, APC (Paris) : Calcul et données
- **27-28 octobre 2022**, siège du CNRS : Jouvences de Belle-2 et ALICE, participation à Hyper-Kamiokande et information sur EIC
- **6-7 février 2023**, LPNHE (Paris) : LHCb et physique des ions lourds au HL-LHC
- **3-4 juillet 2023**, siège du CNRS : Ondes gravitationnelles et fond diffus cosmologique
- **23-24 octobre 2023**, siège du CNRS : Détection directe de matière noire

---

## Annexe 4 : Rapporteurs extérieurs

---

De nombreuses personnalités extérieures ont accepté d'assister aux sessions, d'étudier les documents fournis par les équipes des projets examinés "pour avis", et de fournir un rapport, qui a été précieux pour le travail d'évaluation mené par le Conseil. Qu'elles en soient ici remerciées :

- **26-27 juin 2019 : Recherche en physique nucléaire avec des faisceaux d'ions accélérés**  
Dieter ACKERMANN (GANIL), Nicolas ALAMANOS (CEA-IRFU), Michael BLOCK (GSI), Giacomo De ANGELIS (INFN-Legnaro), Fabiana GRAMEGNA (INFN-Legnaro), Wolfgang MITTIG (Michigan State Univ.), Antonio MORO (Univ. Sevilla), Marina PETRI (Univ. York), Sunniva SIEM (Fysisk Institutt, Oslo)
- **25-26 février 2020: Les plateformes d'irradiation labellisées**  
Emmanuel BALANZAT (GANIL), Hicham KHODJA (CEA-NIMBE), Claire PACHECO (C2RMF), Jean-Pierre POUGET (INSERM-IRCM), Ian VICKRIDGE (INSP-Sorbonne Univ.)
- **30 juin – 1<sup>er</sup> juillet 2020 : Astroparticules et cosmologie : projets spatiaux à l'IN2P3**  
Yves ANDRÉ (CNES), Didier MASSONNET (CNES)
- **27-28 octobre 2020 : Complémentarité sol-espace dans les recherches sur le CMB et les ondes gravitationnelles**  
Yves ANDRÉ (CNES), Didier MASSONNET (CNES), Guiseppe RACCA (ESA)
- **9-10 février 2021 : L'accélération et les développements d'accélérateurs**  
Ralph ASSMANN (CERN), Antoine CHANCÉ (CEA-IRFU-SACM), Erk JENSEN (CERN), Paolo PIERINI (ESS), Franck ZIMMERMANN (CERN)
- **29-30 juin 2021 : Théorie, incluant les thématiques nucléaire, particules (dont gravitation) et astroparticules**  
Gianluca COLO (Univ. Milano), Fiorenza DONATO (Univ. Torino), Stéphane GORIELY (IAA-Bruxelles), Antonio PICH (Univ. Valencia), Martin KUNZ (Univ. Genève), Urs WIEDEMANN (CERN)
- **26-27 octobre 2021 : Neutrinos**  
Nathalie BESSON (CEA-IRFU), Albert DE ROECK (CERN), Marumi KADO (Univ. Roma), Federico SANCHEZ – NIETO (Univ. Genève)
- **3-4 février 2022 : La physique nucléaire pour l'énergie**  
Noël CAMARCAT (ENS-Mines, Paris), Cyrille DE SAINT JEAN (CEA-DEN), Cheikh DIOP (CEA-DEN), Simone MASSARA (AIEA), Andreas PAUTZ (PSI), Jérôme SERP (CEA-DEN)
- **23-24 juin 2022 : Calcul et données**  
Simone CAMPANA (CERN, WLCG), Franco CARBOGNANI (EGO), Michel DAYDÉ (IRIT), Alberto DI MEGLIO (CERN), Tommaso DORIGO (INFN-Univ. Padova), Graeme STEWART (HSF, LHCC)
- **27-28 octobre 2022 : Jouvences de Belle-2 et ALICE, participation à Hyper-Kamiokande et information sur EIC**

Aoife BHARUCHA (CPT, Marseille), Florence ARDELLIER (APC), Cédric CERNA (CENBG), Éric DELAGNES (CEA-IRFU), Albert DE ROECK (CERN), Éric KAJFASZ (CPPM), Émilie MAURICE (LLR-École polytechnique), Stéphane T'JAMPENS (LAPP), Klaus WERNER (Subatech)

- **6-7 février 2023 : LHCb et physique des ions lourds au HL-LHC**

Aoife BHARUCHA (CPT, Marseille), Alessandro CERRI (Univ. Sussex), François LE DIBERDER (IJCLab), Peter KRIZAN (Univ. Ljubljana)

- **3-4 juillet 2023 : Ondes gravitationnelles et fond diffus cosmologique**

Michael BROWN (Univ. Manchester), Gerhard HEINZEL (MPI, Hannover), Francesco PIACENTINI (Univ. Roma), David REITZE (Caltech)

- **23-24 octobre 2023 : Détection directe de matière noire**

Pierre BRUN (CEA-IRFU), Paolo GORIA (LNGS/INFN), Karoline SCHAEFFNER (Max Planck Institute)

---

## Annexe 5 : Références

---

- [1] ApPEC, (Bruxelles, « L'avenir de la physique des astroparticules en Europe », décembre 2023), <https://www.appec.org/roadmap> et <https://indico.cern.ch/event/1339060/>
- [2] [Recherches au CNRS et Changement climatique](#)
- [3] [Avis du COMETS « Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche – Une responsabilité éthique](#)
- [4] [Schéma Directeur « Développement Durable – Responsabilité Sociétale et Environnementale » \(SD DD&RSE\)](#)
- [5] [Labos 1point5](#)
- [6] [Organigramme | CNRS Nucléaire & Particules](#)
- [7] [\[2203.12389\] Climate impacts of particle physics](#)
- [8] [\[2201.08748\] Estimate of the carbon footprint of astronomical research infrastructures](#)
- [9] [CERN Environment Report—Rapport sur l'environnement 2021–2022](#)

### Rappel des pages internet citées dans le texte :

Site de l'exercice de prospective de l'IN2P3 : <https://prospectives2021.in2p3.fr/> .

Rapport de synthèse des prospectives de l'IN2P3 :

[https://prospectives2020.in2p3.fr/wp-content/uploads/2023/01/FrenchRoadmap2030\\_NuclearParticleAstroparticlePhysics.pdf](https://prospectives2020.in2p3.fr/wp-content/uploads/2023/01/FrenchRoadmap2030_NuclearParticleAstroparticlePhysics.pdf)

Page web du Conseil scientifique de l'IN2P3 :

<https://www.in2p3.cnrs.fr/fr/le-conseil-scientifique-de-lin2p3>

Site du CC-IN2P3 contenant certaines vidéos des sessions : <https://webcast.in2p3.fr/>

« La recherche publique en France en 2019 : Diagnostic et propositions du Comité national » :

[https://c3n-cn.fr/sites/default/files/u88/Propositions\\_Comitenational\\_Juillet-2019.pdf](https://c3n-cn.fr/sites/default/files/u88/Propositions_Comitenational_Juillet-2019.pdf)

Recommandation du Comité national sur la loi de programmation pluriannuelle de la recherche (LPPR) :

[https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/IN2P3/CS-IN2P3\\_Recommandation-sur-LPPR.pdf](https://www.cnrs.fr/comitenational/csi/reco/Recommandations/IN2P3/CS-IN2P3_Recommandation-sur-LPPR.pdf).

Site de la Coordination des instances du Comité national du CNRS (C3N) : <https://c3n-cn.fr/>.

---

## Annexe 6 : Table des matières

---

Introduction.....	1
I. Les missions de l'IN2P3.....	2
II. Thèmes de recherche à l'IN2P3 .....	3
A. Physique des particules et physique hadronique .....	3
B. Physique nucléaire et applications.....	4
C. Astroparticules et cosmologie .....	4
D. Accélérateurs et technologie.....	5
E. Interdisciplinarité .....	6
III. Le Conseil scientifique d'institut.....	6
A. Fonctionnement des sessions du Conseil.....	7
B. Autres travaux du Conseil .....	9
IV. Projets et expériences examinés par le Conseil ces dernières années .....	9
A. Physique des particules et physique hadronique .....	9
B. Physique nucléaire et applications.....	9
C. Astroparticules et cosmologie .....	10
V. Sujets qui n'ont pas pu être examinés lors de notre mandature .....	10
A. Physique des particules : jouvences ATLAS et CMS pour le HL-LHC.....	10
B. Physique hadronique : EIC.....	10
C. Désintégration double-bêta sans neutrino.....	11
D. Physique nucléaire de basse énergie.....	11
E. Astroparticules .....	11
F. Interdisciplinarité .....	12
VI. Projets examinés pour lesquels nous recommandons un suivi.....	13
A. Les jouvences de LHCb et ALICE .....	13
B. DUNE .....	13
C. Le CMB et Simons Observatory (SO) .....	14
D. L'Intelligence Artificielle et le calcul Haute Performance.....	14
VII. Projets qu'il nous semble important de commencer à examiner rapidement .....	15
A. Le « Future Circular Collider » (FCC) .....	15
B. Autres futurs accélérateurs.....	17
C. Astronomie Gamma au MeV .....	17
D. Astronomie gamma TeV-PeV .....	17
E. La Physique des neutrinos au delà de 2030 .....	18
VIII. Sujets transverses que nous recommandons d'examiner.....	18
A. Modification du périmètre de la section 01 .....	18
Avis et recommandations.....	20
B. L'adaptation bas carbone des activités à l'IN2P3.....	21
Avis et recommandations.....	22
C. Les entraves administratives à la recherche à l'IN2P3 et au CNRS .....	23
Avis et recommandations.....	24
Conclusion.....	24
Annexe 1 : Liste des abréviations et acronymes.....	25
Annexe 2 : Indications pour les projets examinés par le Conseil scientifique de l'IN2P3...	29
Annexe 3 : liste des sessions de la mandature .....	31
Annexe 4 : Rapporteurs extérieurs .....	32
Annexe 5 : Références .....	34
Annexe 6 : Table des matières .....	35