

COMITÉ NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CONSEIL SCIENTIFIQUE D'INSTITUT

# Compte rendu

---

Conseil scientifique de l'IN2P3  
3-4 février 2022

## Sommaire

<b>1. Introduction à la séance du 3-4 février</b>	<b>4</b>
<b>2. Modélisation pour la physique des réacteurs : intérêt d'une plateforme numérique</b>	<b>4</b>
2.1 Présentation de la plateforme	4
<b>3. Couplages « multi-physiques » et l'installation expérimentale FEST</b>	<b>6</b>
3.1 Présentation	6
3.2 Avis et recommandations	7
<b>4. Les données nucléaires</b>	<b>9</b>
4.1 Description du projet	9
4.2 Avis du Conseil	11
4.3 Recommandations	11
<b>5. La neutronique expérimentale par méthodes innovantes</b>	<b>13</b>
5.1 Présentation	13
5.2 Avis et recommandations	14
<b>6. Les scénarios électronucléaires et la gestion du Plutonium</b>	<b>15</b>
6.1 Description de l'étude des scénarios électronucléaires	15
6.2 Avis et recommandations	16
<b>7. Les réacteurs à sel fondu</b>	<b>17</b>
7.1 Description des réacteurs à sels fondus	17
7.2 Avis et recommandations	18
<b>8. Discussions internes au CSI</b>	<b>19</b>
8.1 Discussions avec la direction	19
8.2 Vie du Conseil	20

**Présents** : G. Brooijmans, H. Costantini, B. Cros, N. Chanon, O. Drapier, P. Janot, L. Fayard, B. Fernández Domínguez, V. Givaudan, S. Henrot-Versillé, D. Laporte, M. Lindroos, F. Marion, R. Maurice, N. Neyroud Gigleux, C. Nones, B. Ramstein, M. Rousseau, C. Smith, R. Trebossen, G. Verde, M. Yamouni, F. Yermia

**Invités** : P. Balcou (CS CNRS), J.-J. Hernandez-Rey (CS CNRS)

**Excusée**: S. Escoffier-Martory

**Orateurs** : A. Billebaud (LPSC), S. David (IJCLab), X. Doligez (IJCLab), M. Ernoult (IJCLab), V. Ghetta (LPSC), M. Kerveno (IPHC), P. Rubiolo (LPSC), J.-L. Lecouey (LPCC), E. Merle (LPSC)

**Rapporteurs** : P. Blaise (CEA), N. Camarcat (ENSMP), C. De Saint Jean (CEA), ), C. Diop (CEA), S. Massara (AIEA), A. Pautz (PSI), J. Serp (CEA)

**Membres présents de la direction** : U. Bassler, S. Crépe-Renaudin, S. David, B. Giebels, M. Grasso, S. Incerti, R. Pain

## 1. Introduction à la séance du 3-4 février

La séance du 3-4 février 2022 était dédiée à l'examen des grands projets sur la physique nucléaire pour l'énergie à l'IN2P3. Cette séance s'est tenue à la fois en présentiel et à distance.

### **Programme de la session ouverte :**

- 1) Les recherches à l'IN2P3 en lien avec l'énergie nucléaire (S. David)
- 2) Les activités sur l'énergie nucléaire au sein du GDR SciNEE (A. Billebaud)
- 3) Les phénomènes physiques et le projet de plateforme de modélisation (X. Doligez)
- 4) Les couplages multi-physiques (P. Rubiolo)
- 6) Mesures, incertitudes, calcul (M. Kerveno)
- 7) L'installation expérimentale FEST – Fluids Experiments and Simulation (V. Ghetta)
- 8) La neutronique expérimentale par méthodes innovantes (J.-L. Lecouey)
- 9) Les scénarios nucléaires en REP et RNR, et la gestion du plutonium (M. Ernoult)
- 10) Les réacteurs à sels fondus (E. Merle)

Toutes les présentations sont accessibles depuis la page web du CSI IN2P3 :

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

Le présent compte rendu aborde spécifiquement les projets de plateforme numérique pour la modélisation en physique des réacteurs (section 2), les couplages multi-physiques et l'installation expérimentale FEST (section 3), les données nucléaires (section 4), la neutronique expérimentale par méthodes innovantes (section 5), les scénarios électronucléaires et la gestion du plutonium (section 6), les réacteurs à sels fondus (section 7). Les discussions internes au Conseil font l'objet de la section 8.

## 2. Modélisation pour la physique des réacteurs : intérêt d'une plateforme numérique

### 2.1 Présentation de la plateforme

L'IN2P3 s'implique dans la recherche sur l'énergie nucléaire depuis de nombreuses années. La modélisation pour la physique des réacteurs peut viser différents objectifs tels que l'économie des ressources, la minimisation de la production de déchets, ou encore l'amélioration de la sûreté. Ces recherches aux objectifs appliqués sont aussi des recherches fondamentales de haut niveau, qui consistent à modéliser de façon précise des phénomènes physiques complexes et souvent interdépendants.

Quatre laboratoires de l'IN2P3 sont impliqués dans ces recherches : le LPSC, Subatech, le LPC et l'IJCLab. Le personnel permanent impliqué représente environ 4 ETPs, auxquels il faut ajouter le personnel non permanent (en moyenne 1 à 2 thèses par an).

La stratégie générale consiste à identifier les processus fondamentaux en jeu et de les hiérarchiser afin de proposer des modélisations au niveau de précision voulu, en fonction des objectifs visés (ces derniers en lien avec la politique nationale et internationale du domaine de l'énergie nucléaire). Pour cela, il est nécessaire de développer les codes de calculs et les méthodes permettant de traiter différents effets physiques ainsi que leurs couplages éventuels.

Les méthodes développées sont validées numériquement, par comparaison avec d'autres codes et/ou par comparaison avec des données expérimentales. L'accès aux données expérimentales peut d'ailleurs être problématique car certaines données sensibles ne sont pas publiques.

Depuis le début de cette activité à l'IN2P3, une réelle expertise a été développée. Les équipes de l'institut sont désormais reconnues internationalement, et mènent des travaux de pointe notamment concernant le développement de méthodes Monte-Carlo avancées, la propagation des incertitudes dans les calculs couplés, ou encore l'équivalence transport/diffusion. Le développement du code SMURE (« Serpent Monte Carlo N-Particles Utility for Reactor Evolution »), permettant en particulier d'interfacer des codes de transport Monte Carlo avec des équations d'évolution est un exemple parmi d'autres montrant d'une part l'expertise des équipes de l'IN2P3 et d'autre part l'importance des méthodes modulaires.

Un enjeu pour le futur, qui a notamment émergé lors de l'exercice de perspectives de l'institut, consistera à définir un cadre de travail commun aux différents codes afin de développer une plateforme numérique robuste et polyvalente. L'idée est en effet de permettre à l'utilisateur de choisir les différentes briques de sa modélisation en fonction de ses objectifs (en particulier, en choisissant l'équilibre entre précision et coût de calcul). Évidemment, toutes les combinaisons ne sont pas possibles. La construction et la valorisation d'une telle plateforme numérique renforcera indéniablement la synergie entre les équipes de l'IN2P3, ce qui ne peut qu'élargir encore l'impact de ces recherches.

Actuellement, le développement et la maintenance des codes CLASS (« Core Library for Advanced Scenario Simulation ») et SMURE font l'objet du master projet OSCAR. Les simulations couplées (neutronique et thermohydraulique), les calculs de propagation d'incertitudes et les approches du type apprentissage automatique font notamment partie des développements emblématiques proposés. L'interfaçage de ces deux codes n'est pas une mince affaire et on peut considérer le master projet OSCAR comme une première étape vers une plate-forme numérique commune. Afin de renforcer l'interaction avec la partie « multi-physique » (section 3), une piste pour le futur pourrait être par ailleurs d'intégrer la suite logicielle OpenFOAM (« Open Field Operation and Manipulation ») dans la future plateforme.

Les travaux de l'IN2P3 se placent dans un contexte national particulier, car le développement et l'exploitation de réacteurs nucléaires sont bien entendu dirigés par d'autres acteurs : l'État qui peut à tout moment prendre une décision couperet, le CEA ou l'IRSN qui sont directement mandatés pour travailler sur ce sujet, et enfin les industriels (EDF, Framatome, etc.). Un positionnement clair est affiché : les équipes de l'IN2P3 visent à explorer le potentiel de différents types de systèmes et non à mener des études de sécurité.

Ce rôle prospectif, basé sur une expertise reconnue, se traduit par des collaborations industrielles avec les autres acteurs du domaine, ou dans des projets communs avec le CEA ou l'IRSN, notamment au travers de l'insertion d'anciens étudiants au sein de ces structures.

## **2.2 Avis et recommandations**

Les recherches liées à la modélisation pour la physique des réacteurs s'insèrent parfaitement dans le cadre des motivations scientifiques formulées dans le cadre du GT11 lors de l'exercice de perspectives de l'IN2P3 : « Exploration du potentiel de l'énergie nucléaire pour le futur et son impact sur les ressources, les déchets et les coûts », et « Faire face au défis présents et futurs de l'énergie nucléaire ». Les équipes de l'IN2P3 ont développé une expertise reconnue internationalement et qui a pleinement sa place au sein de l'institut et dans le paysage national du nucléaire.

Le projet de plateforme numérique, visant à améliorer les interactions entre les équipes de l'IN2P3 et à mieux valoriser les codes développés dans les laboratoires, doit être pleinement soutenu par l'institut. En particulier, sa mise en œuvre ne pourra se faire sans l'implication d'un personnel dédié, avec un profil hybride informatique/physique. Afin de permettre un tel développement, le Conseil recommande un soutien accru en ressources humaines sur ce projet.

### Executive summary:

Research related to modeling for reactor physics fits perfectly into the framework of the science drivers formulated within the framework of IN2P3 prospective GT11: "Exploring the potential of nuclear energy for the future and its impact on resources, wastes and costs" and "Facing the present and future nuclear energy challenge". The IN2P3 teams have developed internationally recognized expertise which has its full place within the institute and in the national nuclear landscape.

The digital platform project, aimed at improving interactions between IN2P3 teams and better promoting the codes developed in the laboratories, should be fully supported by IN2P3. In particular, its implementation requires the involvement of a dedicated personnel. In order to allow such development, the Council recommends increased support in human resources for this project.

## **3. Couplages « multi-physiques » et l'installation expérimentale FEST**

### **3.1 Présentation**

Le domaine des couplages « multi-physiques » est l'étude et la modélisation du comportement des matériaux lorsque les grandeurs caractéristiques qui les décrivent sont corrélées et relèvent de plusieurs domaines de la physique. L'Installation expérimentale FEST (« Fluids Experiment and Simulations in Temperature ») est un ensemble de dispositifs expérimentaux dédié à l'étude de systèmes complexes impliquant des réactions nucléaires en milieu fluide ou solide, avec transfert de masse et d'énergie, changements de

phase et réactions chimiques. Les thèmes Couplages « multi-physiques » et Installation expérimentale FEST ont fait l'objet de présentations séparées en séance, portant notamment sur les sels fondus. Les deux thèmes étant fortement liés et concernant les mêmes physiciens, ils sont réunis dans une même section du présent rapport.

Le développement de modèles et codes « multi-physiques » au LPSC est effectué dans le contexte des réacteurs à sels fondus. Ce choix s'avère pertinent pour deux raisons principales : (i) il s'agit d'un sujet de recherche porté par l'IN2P3 depuis de nombreuses années et récemment mis en avant du point de vue politique avec le plan « France 2030 » et (ii) l'utilisation d'un combustible liquide induit un couplage neutronique - thermohydraulique plus important que pour d'autres types de réacteurs. En d'autres termes, il s'agit d'un système de choix pour le développement de modèles couplant la neutronique et la dynamique des fluides. La stratégie de développement est basée sur l'intégration du logiciel Serpent (pour la neutronique) dans OpenFOAM (pour la résolution du système d'équations différentielles en neutronique et en thermohydraulique). Enfin, un module est dédié à la thermomécanique, le sel fondu étant modélisé en trois zones principales : phase liquide, phase solide et phase intermédiaire. Bien que l'objectif ne soit pas de produire une plateforme générale de modélisation des réacteurs nucléaires, il faut noter que des projets connexes vont au-delà du contexte des sels fondus via des collaborations avec d'autres acteurs du secteur (IRSN, EDF). Concernant la thématique des sels fondus, les travaux de modélisation sont menés en étroite collaboration avec les expériences, en particulier via le projet SWATH de la plateforme FEST.

Les activités expérimentales du groupe FEST sont liées principalement à l'étude des réacteurs à sels fondus, mais concernent aussi l'étude de cibles liquides de production de neutrons. Une première plateforme FFFER (« Force Fluid Flow for Experimental Research »), entièrement conçue par le LPSC et destinée à la méthode d'injection de bulles pour l'extraction des produits de fission dans des sels fondus fluorés, a été exploitée jusqu'en 2017. Depuis, les travaux de l'équipe se sont développés dans le cadre des projets européens successifs SAMOFAR (2015-2019) et SAMOSAFER (2019-2023), en associant systématiquement simulations numériques et expérimentation. Les phénomènes hydrauliques et thermiques en jeu dans les réacteurs à sels fondus sont étudiés, en suivant la liste de priorités de la table PIRT (« Phenomena Identification and Ranking Table ») établie dans le cadre du projet européen SAMOFAR. Deux plateformes ont été construites dans le cadre de ces projets, SWATH-W et SWATH-S, pour étudier respectivement les aspects purement hydrauliques et ceux liés au transfert de chaleur dans les sels fondus fluorés, en confrontant les mesures aux résultats d'un modèle thermique complet du dispositif expérimental. Un effort particulier a été mis sur l'étude de la vanne de vidange du réacteur, élément clé du système de drainage des réacteurs à sels fondus utilisé en cas d'incident (ou pour de la maintenance). Les aspects de solidification du sel fondu font aussi l'objet d'expériences détaillées. Des développements sont prévus dans le cadre du projet français PIA-ISACC, consacré aux études de réacteurs à sels chlorés (2022-2026), avec la construction d'une nouvelle boucle, plus petite que FFFER. Il faut noter que la plateforme FEST est utilisée par ailleurs pour le développement de cibles de lithium liquides pour la production intense de neutrons. L'équipe du LPSC s'intéresse en particulier aux applications pour la thérapie par capture de neutrons.

### **3.2 Avis et recommandations**

Les thématiques « couplages multi-physique » et FEST sont portées par une petite équipe du LPSC. En choisissant une thématique spécifique (les sels fondus) et en associant fortement la modélisation et les expériences, cette petite équipe a su développer une expertise de haut niveau. Le choix de l'intégration du logiciel Serpent dans OpenFOAM est particulièrement judicieux : ce sont des codes libres d'accès, donc modifiables par l'utilisateur, avec des parties clés déjà codées. Depuis 2014, 17 stagiaires, 7 thèses et 3 post-docs ont été accueillis et formés dans l'équipe. Cependant, l'équipe ne totalise que 9 publications sur cette même période. Les développements théoriques et expérimentaux de longue haleine, nécessitant que les deux parties progressent simultanément pour valider une étape, pourraient être à l'origine de cet état de fait. Deux enjeux principaux se dessinent pour la suite : (i) s'assurer de la pérennité des études expérimentales tant en termes de fonctionnement que de personnel (le départ en retraite de la responsable scientifique de la plateforme FEST est prévu pour 2026) et (ii) s'impliquer dans la construction d'une plateforme numérique plus vaste avec les autres acteurs de l'IN2P3 (avec par exemple l'intégration d'OpenFOAM au sein de cette plateforme). Une telle implication permettrait de valoriser davantage les codes développés au sein de l'équipe.

Les plateformes développées au LPSC sont des outils uniques en France et indispensables pour le développement des réacteurs à sels fondus. Ces outils sont complexes, doivent agréger science académique et technologie pour être opérés de manière efficace. L'équipe a acquis une très bonne expertise, l'approche associant aspects expérimentaux et numériques est très fructueuse. La collaboration avec les expériences, en particulier via le projet SWATH de la plateforme FEST, est une des forces du projet, mais aussi une limitation potentielle : les expériences nécessitent un personnel suffisant et un budget adapté. Bien que les compétences soient présentes à l'IN2P3 pour mener ces activités pluridisciplinaires au plus haut niveau, un rapprochement avec des équipes de l'INP ou INC pourrait être bénéfique pour augmenter la production scientifique. Le Conseil encourage l'organisation de rencontres ou d'ateliers de travail pour identifier des synergies dont pourrait bénéficier l'activité liée à FEST. Dans le contexte actuel, il semble très important de maintenir un savoir-faire dans le domaine des réacteurs à sels fondus. Le Conseil recommande donc à l'IN2P3 de veiller au maintien de ces activités, en prenant en compte en particulier le prochain départ à la retraite mentionné plus haut.

#### Executive summary:

The "multi-physics couplings" and FEST themes are carried out by a small team of LPSC. By choosing a niche theme (molten salts) and by strongly coupling modeling and experiments, this small team has been able to develop high-level expertise. The choice of integrating the Serpent software into OpenFOAM is particularly wise: these are free open-source codes, comprising key parts that are already coded. Since 2014, 17 trainees, 7 theses and 3 post-docs have been hosted. However, the team only totals 9 publications over this same period. It is obvious that the theoretical and experimental developments carried out are long-term and require that both parties have advanced at the same level to validate a step, which could explain this state of affairs. Two main challenges are emerging for the future, (i) ensuring the sustainability of experimental studies both in terms of operation and personnel (the retirement of the scientific leader of the FEST platform is planned for 2026) and (ii) getting involved in the construction of a larger digital platform with the other IN2P3

players (with, for example, the integration of OpenFOAM within this platform). Such involvement would make it possible to further valorize the codes developed within the team.

The platforms developed at LPSC are experimental tools that are unique in France and essential for the development of molten salt reactors. These tools are complex, and must combine academic science and technology to be operated in a relevant way. The team has acquired very good expertise, the approach combining experimental and numerical aspects appears very fruitful. The collaboration with experiments, in particular via the SWATH project of the FEST platform, is one of the assets of the project which also triggers a potential limitation: experiments require sufficient staff and an appropriate budget. Although the skills are present at IN2P3 to carry out these multidisciplinary activities at the highest level, a rapprochement with teams from the INP or INC could be beneficial to increase scientific production. The Council encourages the organization of meetings or workshops to identify synergies that could benefit the activity related to FEST. In the current context, it seems very important to maintain a strong expertise in the field of molten salt reactors. The Council therefore recommends that IN2P3 ensures the sustainability of these activities, owing in particular to the forthcoming retirement of one of the team members.

## 4. Les données nucléaires

### 4.1 Description du projet

De par son expertise en physique nucléaire, l'IN2P3 est naturellement impliqué dans la thématique des données nucléaires, en particulier depuis la Loi relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (loi Bataille de 1991, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000356548/>). Cette thématique est au cœur de la problématique de l'énergie nucléaire. Dans le domaine des applications à l'énergie nucléaire, on entend par donnée nucléaire le résultat d'une mesure expérimentale ou, lorsque la mesure n'est pas réalisable, le résultat d'un calcul théorique. Les nouvelles données nucléaires permettent de consolider les bases de données utilisées, pour appréhender l'évolution des cœurs de réacteurs en fonctionnement, pour modéliser de nouveaux systèmes théoriques, étudier des scénarios à long terme ou encore des aspects de retraitement ou de stockage.

Les recherches développées dans ce cadre sont intimement liées au contexte national et international. Historiquement, ces activités ont été axées sur la problématique de la transmutation et de la spallation jusqu'en 2006, date de fin de la loi Bataille. Depuis lors, ces activités ont été recentrées vers une recherche plus fondamentale des processus au cœur des réacteurs.

La thématique des données nucléaires est portée à l'IN2P3 par 7 chercheurs et 11 enseignants-chercheurs permanents représentant 7 ETP répartis sur 6 laboratoires (IJCLab, IPHC, LP2i, LPC Caen, LPSC et Subatech). Ces activités sont regroupées au sein de l'IN2P3 sous le master projet OPALÉ (des données expérimentales à l'évaluation pour les réacteurs). Plus largement, ces activités sont intégrées au niveau CNRS dans le GDR SciNNE (Sciences Nucléaires pour l'Énergie et l'Environnement) piloté par l'IN2P3, au projet structurant NACRE (Le Noyau Au Cœur de Réacteur ; co-portage CNRS-CEA) du programme NEEDS (CNRS, Andra, BRGM, CEA, EDF, Framatome, IRSN et Orano) porté

par l'IN2P3, au niveau international au projet européen SANDA (« Supplying Accurate Nuclear Data for energy and non-energy Applications »). Toutes ces activités sont réalisées en lien étroit avec différentes agences telle que l'AEN (Agence pour l'Énergie Nucléaire) ou l'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique). Les budgets de recherches proviennent à 25% de l'IN2P3, 35% du programme NEEDS et 40% du projet européen SANDA.

Au-delà du volet expérimental, les différentes équipes ont montré la volonté de développer leurs activités vers les évaluations théoriques. Celles-ci passent par le développement de modèles théoriques robustes et prédictifs, dont la sensibilité aux mécanismes de réaction et à la structure nucléaire établit un lien naturel entre la thématique des données nucléaires et la physique nucléaire fondamentale. Expérimentalement, le choix des systèmes étudiés est effectué en concertation avec les différents acteurs nationaux et internationaux du domaine. Il vise à répondre aux demandes formulées dans la liste des mesures prioritaires de données nucléaires définie par l'AEN. Pour répondre à ces différents besoins, les équipes du domaine réalisent des mesures de sections efficaces de réaction, de rendement des produits de fission et de leurs décroissances.

Les mesures de section efficaces sont développées dans trois laboratoires :

- L'IPHC travaille principalement sur la mesure de la diffusion inélastique ( $n, n'$ ) sur des isotopes d'uranium, thorium, tungstène et prochainement de plutonium par la méthode de la spectroscopie des gamma prompts auprès de l'installation EC-JRC-GELINA en collaboration avec le JRC-Geel et l'IFIN HH Bucarest. L'IPHC s'est aussi largement investi dans la modélisation de ces réactions, qui requiert une bonne connaissance de la structure du noyau étudié. En particulier, une étude détaillée de la réaction sur  $^{238}\text{U}$  a été réalisée, en mettant en place une collaboration avec les théoriciens du CEA/DAM de Bruyères-le-Châtel, le LANL et l'AIEA. L'équipe a fourni ces dernières années des contributions techniques importantes pour le spectromètre GRAPHÈME, et développe actuellement un détecteur d'électrons de conversion (DELCO). Par ailleurs, l'équipe a joué un rôle majeur dans la construction du deuxième collimateur de NFS à Spiral2.
- Le LP2i travaille sur la mesure de la section efficace de fission du  $^{242}\text{Pu}$ . Ce projet comporte, un volet évaluation théorique (co-direction d'une thèse avec le CEA/DES) mais également un volet expérimental avec, entre autres, le développement d'un détecteur de neutrons à protons de recul permettant la normalisation des sections efficaces de fission à la diffusion élastique  $^1\text{H}(n, n)$ . Une première série d'expériences, qui a permis une mesure plus précise, a été réalisée et va se poursuivre au EC-JRC-Geel.
- Le LPC-Caen travaille sur la mesure de la section efficace de réaction  $^{16}\text{O}(n, ^{13}\text{C})$  et  $^{19}\text{F}(n, ^{16}\text{N})$ , grâce au développement de la chambre d'ionisation scintillante SCALP, utilisée comme cible active. Des propositions d'expériences ont été déposées et acceptées auprès des installations de nELBE (HZDR, Dresde, Allemagne), de GELINA (JRC-Geel, Belgique) et de NFS (GANIL, Caen, France) en 2019. L'équipe s'investit aussi dans l'évaluation de ces données, en collaboration avec le LEPH Cadarache, avec notamment une thèse en cotutelle sur le sujet.

Les mesures de rendements de fission sont développées dans deux laboratoires :

- L'IJCLab contribue à la mesure des taux de production des fragments et de leurs énergies de recul dans le cadre de la collaboration SOFIA. La mesure en coïncidence de la charge et de la masse des deux fragments prompts de fission, se fait à GSI auprès du dipôle ALADIN. L'équipe a la responsabilité des MWPC dans l'expérience. Il est à noter que la collaboration travaille également sur des mesures plus fondamentales comme l'exploration de nouveaux mécanismes de fission. Les futures expériences SOFIA reposent sur le développement des installations de FAIR (SuperFRS et R3B), avec un intérêt majeur pour un éventuel faisceau de plutonium.
- Le LPSC travaille en collaboration avec le CEA sur les mesures directes de rendements en masse et en charge de fission induite par neutrons thermiques auprès de l'installation ILL de Grenoble et du spectromètre Lohengrin. Comme dans le cas de SOFIA, ces données permettent de contraindre la description théorique du processus de fission. Un travail important d'analyse de données et d'interprétation est également engagé par l'équipe en vue d'améliorer les codes utilisés pour l'évaluation des données. L'équipe souhaite réaliser une nouvelle mesure de la réaction  $^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$  et développe pour cela un détecteur temps de vol pour améliorer l'identification en masse des fragments.

La mesure des décroissances des produits de fission est développée dans un laboratoire :

- Subatech travaille sur la désintégration bêta des produits de fission. Ces travaux sont réalisés par l'emploi de la technique de spectroscopie gamma par absorption totale (TAGS). Deux campagnes de mesures ont été réalisées à Jyväskylä en collaboration avec l'IFIC de Valencia. Ces travaux, outre l'amélioration des données nucléaires, ont des répercussions pour la connaissance du spectre de neutrinos émis par les réacteurs, pour leur utilisation, soit dans le domaine de la physique fondamentale, soit pour la surveillance des réacteurs. Sur le plan technique, l'équipe a réalisé un détecteur d'électrons pour l'étude de la forme de leurs spectres en énergie et porte un projet d'amélioration du détecteur actuel pour les mesures TAGS avec des objectifs plus larges que les données nucléaires (structure et astrophysique nucléaire), le projet N2STAR. Subatech a également développé un code permettant de simuler la puissance résiduelle des réacteurs. Ce code est utilisé pour tester l'impact des nouvelles mesures et établir de nouvelles listes de mesures prioritaires.

Un effort général est en cours pour rapprocher la communauté des données nucléaires de celle de structure nucléaire afin de lever des verrous lors de l'utilisation de techniques expérimentales qui dépendent de la connaissance de la structure du noyau. L'action lancée dans le cadre de NACRE a déjà abouti à des expériences communes à ALTO et NFS.

Les collaborations avec le CEA permettent aux équipes de l'IN2P3 travaillant sur les données de s'impliquer plus fortement dans l'évaluation théorique à travers notamment plusieurs travaux de thèses co-dirigés par les deux instituts.

L'activité se développe aussi en direction de la définition des besoins en données nucléaires, en collaboration avec les physiciens des réacteurs.

## 4.2 Avis du Conseil

Parmi les activités d'applications à l'énergie nucléaire de l'IN2P3, le domaine des mesures de données nucléaires joue un rôle très particulier. De par les techniques expérimentales et les modèles utilisés, il est en effet en lien direct avec les activités de recherche en physique nucléaire fondamentale de l'IN2P3, tout en ouvrant la discipline vers la physique des réacteurs et des scénarios nucléaires. Ainsi, les mesures de données nucléaires sont liées, en amont, à la définition des besoins et, en aval, à l'évaluation des données.

Les activités de l'IN2P3 dans le domaine des mesures expérimentales sont structurées et cohérentes. Dans ce cadre, le master projet OPALE est un outil essentiel. Ces activités sont en accord avec les besoins exprimés par les instances internationales du domaine.

Le rapprochement avec la communauté de la physique nucléaire fondamentale (initié dans le projet structurant NACRE du programme NEEDS) apporte un gain important pour les deux communautés sur l'interprétation des données, et place les activités de l'IN2P3 à un très bon niveau scientifique international.

NACRE a également permis de renforcer les collaborations avec les équipes du CEA, qui ont une grande expertise dans le domaine. Les équipes de l'IN2P3 ont pu ainsi développer des activités d'évaluation en plus des mesures. Le GDR SciNNE et le dynamisme des équipes ont de plus permis de créer des synergies nouvelles avec des disciplines connexes comme la physique des réacteurs.

De manière générale, l'interaction avec les agences internationales d'évaluation ainsi que les échanges avec les théoriciens sur la modélisation spécifique à ce domaine, sont clairement établies et sont en constante augmentation. Ceci montre bien, d'une part la pertinence et la cohérence de ces activités, et d'autre part le souhait des équipes de se rapprocher de l'évaluation des données.

### **4.3 Recommandations**

Le groupe de l'IN2P3 travaillant sur les données nucléaires est dynamique et productif. Il a su saisir différentes opportunités en développant des collaborations. Ce potentiel n'est cependant que partiellement exploité, à cause de la petite taille du groupe. Le Conseil recommande que ce domaine-clé soit renforcé, car il est source d'enrichissement mutuel entre la recherche en structure nucléaire fondamentale d'une part, et la physique des réacteurs et des scénarios nucléaires d'autre part.

Les équipes travaillent sur plusieurs expériences, avec des techniques variées, ce qui diminue les forces pour une mesure donnée. Le Conseil recommande d'étudier la possibilité d'établir des synergies, à l'intérieur du groupe travaillant sur les données, ou avec les équipes de physique nucléaire fondamentale, pour renforcer l'impact des équipes de l'IN2P3 dans les différentes expériences. En particulier, un soutien sur l'expérience de mesures de rendement de fission SOFIA est nécessaire pour compléter efficacement l'implication technique actuelle. Un rapprochement avec les expériences de fission menées actuellement au GANIL peut permettre d'améliorer cette efficacité.

La spécificité des différentes mesures de réactions avec des neutrons a motivé le développement de détecteurs dédiés. Une réflexion pourrait démarrer pour réfléchir à des expériences combinant les différentes techniques afin de mieux mutualiser les ressources et

exploiter la complémentarité des mesures sur NFS, ou avec d'autres systèmes de détection déjà présents au GANIL, par exemple : ACTAR TPC, fission sur VAMOS, et EXOGAM.

Un atout essentiel de ce groupe est l'expertise technique qui permet des mesures originales et de haute qualité. Le Conseil recommande à l'IN2P3 de veiller à ce que les équipes bénéficient des budgets nécessaires pour maintenir à leur plus haut niveau ces contributions techniques leur donnant une grande visibilité dans les expériences.

#### Executive summary:

Among the nuclear energy application activities of IN2P3, the field of nuclear data measurements plays a very particular role. Because of the experimental techniques and the models used, it is directly linked to the research activities in fundamental nuclear physics of IN2P3, while opening the discipline to the physics of reactors and nuclear scenarios. Thus, nuclear data measurements are linked, upstream, to the definition of needs and, downstream, to the evaluation of the data.

The activities of IN2P3 in the field of experimental measurements are structured and coherent. In this context, the OPALE master project is an essential tool. These activities are in agreement with the needs expressed by the international authorities of the domain.

The rapprochement with the community of fundamental nuclear physics (initiated in the structuring project NACRE of the NEEDS program) brings an important gain for both communities on the interpretation of data, and places the activities of IN2P3 at a very good international scientific level.

NACRE has also strengthened collaborations with the CEA teams, which have a great expertise in the field. The IN2P3 teams have thus been able to develop evaluation activities in addition to measurements. The GDR SciNNE and the dynamism of the teams have also allowed the creation of new synergies with related disciplines such as reactor physics.

In general, the interaction with international evaluation agencies as well as the exchanges with theorists on modeling specific to this field, are clearly established and are constantly increasing. This clearly shows, on the one hand, the relevance and coherence of these activities, and on the other hand, the desire of the teams to get closer to the evaluation of data.

The IN2P3 group working on nuclear data is very dynamic and productive. It has been able to seize different opportunities by developing collaborations. However, this potential is only partially exploited, due to the small size of the groups. The Council recommends this key area to be strengthened, as it is a source of mutual enrichment with research in fundamental nuclear structure on the one hand, and reactor physics and nuclear scenarios on the other.

The teams work on several experiments, with various techniques, which reduces the strengths for a given measurement. The Council recommends to study the possibility of establishing convergences, within the group working on data, or with the fundamental nuclear physics teams, to reinforce the impact of the IN2P3 teams in the different experiments. In particular, a support on the fission yield measurement experiment SOFIA seems necessary to complete efficiently the current technical involvement. A rapprochement with the fission experiments currently carried out at GANIL may improve this efficiency.

The specificity of the various measurements of reactions with neutrons has motivated the development of dedicated detectors. A reflection could start to think about experiments combining different techniques in order to better mutualize resources and to exploit the complementarity of measurements on NFS, or with other detection systems already present at GANIL, for example: ACTAR TPC, fission on VAMOS, and EXOGAM.

An essential asset of this group is the technical expertise which allows original and high-quality measurements. The Council recommends the IN2P3 to ensure that the teams receive the necessary budgets to maintain at their highest level these technical contributions which give them a high visibility in the experiments.

## **5. La neutronique expérimentale par méthodes innovantes**

### **5.1 Présentation**

Les activités de neutronique expérimentale par méthodes innovantes de l'IN2P3 s'inscrivent dans une démarche de R&D et ont été à l'origine motivées par la possibilité de transmuter les actinides mineurs pour réduire la toxicité des déchets radioactifs. Cette opération exige un réacteur nucléaire à spectre rapide, sous la forme soit d'un réacteur critique électrogène, soit d'un réacteur sous-critique dédié, piloté par accélérateur (ADS). Dans le cadre des ADS, une problématique cruciale est la mesure en temps réel de la réactivité du réacteur, pour en garantir la sous-criticité en toutes circonstances.

L'IN2P3 a participé à l'expérience MUSE-4 autour d'une maquette d'ADS à Cadarache, constituée du réacteur MASURCA couplé à l'accélérateur GENEPI. MUSE-4 a notamment permis de proposer une méthodologie de monitoring de la réactivité combinant une mesure relative permanente et une mesure absolue intermittente. Les activités se sont ensuite tournées vers le projet GUINEVERE qui a développé une nouvelle maquette d'ADS à neutrons rapides au SCK CEN (Belgique), associant le réacteur VENUS-F et l'accélérateur GENEPI-3C, et visant à être représentative de futurs ADS de puissance tels que MYRRHA. Plusieurs programmes expérimentaux (FREYA, MYRTE, MYRACL) se sont succédé auprès de GUINEVERE ces dix dernières années.

Un des axes de FREYA consistait en un programme ambitieux de mesures de réactivité, avec diverses méthodes – expériences en source pulsée, expériences en source continue périodiquement interrompue – et dans des configurations variées du réacteur permettant notamment d'explorer une large gamme de réactivité. Un enjeu de ce programme était de dépasser l'approche de la cinématique ponctuelle traditionnellement utilisée pour rendre compte de l'évolution temporelle de la réactivité, en traitant correctement les effets spatio-énergétiques, ce qui demande un recours massif à des simulations du transport des neutrons dans le réacteur.

Un des objectifs de MYRTE était de mener de nouvelles expériences dans une configuration plus représentative de MYRRHA et de son instrumentation, avec notamment l'étude de nouvelles chambres à fission avec différents dépôts équipant VENUS-F. La qualification de cette instrumentation s'est poursuivie dans le projet MYRACL.

L'expertise et les résultats acquis par la mesure de la réactivité dans des ADS ouvrent des perspectives variées, dans et hors de ce cadre. D'une part, une mesure continue de la réactivité lors du rechargement en combustible des réacteurs électrogènes pourrait permettre de repérer rapidement une erreur de chargement. La première phase du projet SALMON, destiné à étudier cette approche, a donné des résultats prometteurs et pourrait être suivie d'une deuxième phase. D'autre part, une étude approfondie des effets spatio-énergétiques en réacteur est nécessaire pour prédire de façon fiable leur impact dans un ADS de puissance. C'est l'objet du projet expérimental SPATIAL récemment proposé, qui sera complété par un important travail de modélisation.

L'IN2P3 est impliqué dans ces activités à travers trois laboratoires : le LPC Caen, le LPSC et l'IJCLab, avec actuellement six physiciens permanents. Leurs contributions portent principalement sur la construction des accélérateurs, les campagnes de mesure, l'analyse des données et leur interprétation, notamment via un important travail de simulation. Elles s'inscrivent dans des projets menés en étroite collaboration avec plusieurs partenaires, dont le CEA et le SCK CEN sont les plus notables. Les financements sont en grande partie d'origine européenne, via Euratom.

## **5.2 Avis et recommandations**

Le Conseil félicite les équipes de l'IN2P3 impliquées dans le programme expérimental développé afin de mesurer la réactivité et proposer des solutions innovantes pour répondre aux défis scientifiques dans le domaine de la physique des réacteurs sous-critiques. Le Conseil souligne l'importance de cette approche qui est unique au niveau français et rare dans le monde.

Les connaissances pointues, aussi bien théoriques qu'expérimentales, des groupes de l'IN2P3 sur les systèmes ADS, acquises lors des études menées auprès de l'installation GUINEVERE au SCK CEN, justifient que les projets SALMON et SPATIAL soient poursuivis. Les nouvelles améliorations proposées dans le cadre de ces deux projets ont un grand intérêt pour le parc actuel et pour d'autres filières de la 4<sup>ème</sup> génération.

Au niveau de l'instrumentation, notamment pour le projet SPATIAL, le Conseil encourage des échanges scientifiques avec les équipes du CEA.

Le Conseil souligne une faiblesse liée à l'existence d'une seule installation adéquate pour mener ces études – ce qui limite le temps de faisceau disponible et pourrait compromettre la poursuite des travaux – sans pour autant identifier de solution pour réduire cette vulnérabilité.

Ces activités bénéficient de financements importants à travers Euratom. Néanmoins, le Conseil pointe la nécessité du financement sollicité auprès de la Banque publique d'investissement pour le projet SPATIAL, indispensable pour assurer un renfort des équipes en vue des nouvelles phases expérimentales.

### Executive summary:

The Council congratulates the IN2P3 teams involved in the experimental program developed to measure the reactivity and to propose innovative solutions to address challenges in the

physics of subcritical reactors. The Council stresses the significance of this approach, which is unique in France and rare worldwide.

The comprehensive knowledge, both theoretical and experimental, of IN2P3 groups about accelerator-driven systems, earned with studies conducted with the GUINEVERE facility at the SCK-CEN site, argues for pursuing the SALMON and SPATIAL projects. The new improvements proposed in the framework of these two projects are of great interest for the current nuclear fleet and for 4<sup>th</sup> generation reactors.

Regarding instrumentation efforts, in particular for the SPATIAL project, the Council encourages interaction with the teams at CEA.

The Council points out a weakness related to the existence of a unique facility suitable for these studies – which restricts beam time availability and could compromise the program – without being able to identify a strategy to mitigate the risk.

These activities receive substantial funding from Euratom. However, the Council highlights that the funding requested from Bpifrance is required to ensure reinforcement of the teams in readiness for the next experimental stages.

## **6. Les scénarios électronucléaires et la gestion du Plutonium**

### **6.1 Description de l'étude des scénarios électronucléaires**

L'équipe en charge d'étudier les scénarios électronucléaires a pour objectif de comprendre la complémentarité entre l'évolution du parc de réacteurs nucléaires (entre réacteurs à eau pressurisée – REP – et réacteurs à neutrons rapides – RNR) et la gestion du plutonium, élément dominant la radiotoxicité des déchets en l'absence de recyclage.

Dans le parc français actuel, constitué uniquement de REP, le minerai d'uranium est assemblé en combustible d'oxyde d'uranium (UOX), et le UOX utilisé est recyclé pour en extraire le plutonium et fabriquer du combustible mixte (MOX). Ceci réduit significativement le volume des déchets à stocker à long terme dans la mesure où le plutonium des combustibles usés reste dans le cycle. Les assemblages ne sont recyclés qu'une fois, mais comme l'intention est de réutiliser le plutonium dans le futur celui-ci n'est pas actuellement considéré comme déchet.

La stratégie pour la gestion du plutonium des MOX usés reposait sur le développement d'un parc de RNR permettant de recycler autant de fois que nécessaire ce plutonium sans que l'évolution de la composition isotopique ou sa variabilité ne soient jamais un problème. Une transition complète du parc français des REP aux RNR nécessiterait 1200 tonnes de Plutonium, contre 350 tonnes produites jusqu'à présent. De plus, les difficultés techniques, industrielles et politiques ont remis en question la construction de RNR. En l'absence de RNR, il est important d'évaluer de manière robuste les stratégies alternatives. Par exemple, le multi-recyclage du plutonium en REP a été étudié dès 2017 par les équipes de l'IJCLab et

Subatech, avant que les acteurs de la R&D industrielle n'en fassent leur stratégie de référence.

Afin de mieux comprendre les implications des différentes options dans ce domaine, le groupe a développé une méthodologie innovante qui permet de comprendre les faisabilités et conséquences de différents scénarios. Les paramètres incluent la puissance nucléaire totale, les différentes fractions de technologies de réacteurs dans le parc, l'introduction du multirecyclage du plutonium, etc. Un grand effort a été fourni pour inclure les incertitudes dans les modèles. La quantification, la propagation des incertitudes et leur influence sur les conclusions des études de scénarios forment l'objectif principal du travail à venir.

L'activité est portée par trois permanents: deux chargés de recherche à l'IJCLab et un maître de conférences à Subatech. Ils sont soutenus par divers CDD et doctorants. Les interactions et échanges avec les partenaires hors IN2P3 sont réguliers (particulièrement avec le CEA) mais peuvent être parfois limités par la confidentialité des données et modèles utilisés par ces derniers.

## **6.2 Avis et recommandations**

Malgré une équipe de petite taille, l'activité sur les scénarios électronucléaires est très bien positionnée aux niveaux national et international, publiant régulièrement dans les revues spécialisées et participant aux ateliers de travail techniques du domaine. S'il semble probable que les grands acteurs industriels aient développé des outils similaires, l'utilité d'un outil basé sur l'expertise indépendante des physiciens nucléaires de l'IN2P3 (dont la méthodologie et les résultats sont publiés) est claire. L'IN2P3 participe à sa mesure à la problématique de la transition énergétique par l'étude de scénarios électronucléaires impliquant des technologies potentiellement déployables (REP/EPR) pour différents cycles (ouverts ou fermés) dans la temporalité de la transition énergétique (de maintenant jusqu'au milieu de siècle).

Le Conseil recommande à la direction de veiller à ce que les équipes soient suffisamment soutenues, en termes de personnel et financements, afin de pouvoir maintenir un haut niveau d'expertise. Le Conseil souligne que ces activités ont un lien très fort avec d'autres disciplines scientifiques (technico-économie, sociologie) et qu'il est important de donner une visibilité à ces recherches appliquées à la hauteur de leur intérêt sociétal qui est indiscutable. Le Conseil encourage les équipes à renforcer leurs liens avec le milieu industriel dans la thématique et l'Institut de continuer à s'affirmer dans cet écosystème. L'IN2P3 peut jouer un rôle à travers ces équipes dans la transition énergétique qui vient afin de faire face aux crises énergétique et climatique.

### Executive summary:

The small IN2P3 group studying electronuclear scenarios has developed a suite of tools to understand the complementarity between the evolution of the nuclear reactor spectrum (e.g. pressurized water vs fast neutron reactors) and plutonium management.

The group is well-positioned, both nationally and internationally, publishing regularly in specialized journals and participating actively in the area's technical workshops. While it seems likely that the large industrial actors have developed similar tools, there is obvious

value in having a tool based on the IN2P3 nuclear physicists' independent expertise, with both methodology and results published. In this way, IN2P3 contributes its knowledge to the energy transition issue, with specific focus on electronuclear scenarii that involve potentially deployable technologies with different types of cycles (open or closed) on the relevant timescale (now until mid-century).

The Council recommends that IN2P3 ensures the teams have sufficient support, both in terms of human and financial resources, in order to maintain a high level of expertise. The Council underlines that these activities have strong connection with other scientific disciplines (techno-economy, sociology) and that it is important for this applied research to have good visibility given their obvious societal impact. The Council encourages the teams to strengthen their links to industry and the Institute to continue to assert itself in this ecosystem. Through these teams the IN2P3 can play a role in the ecological transition needed to mitigate the energy and climate crises.

## 7. Les réacteurs à sel fondus

### 7.1 Description des réacteurs à sels fondus

La thématique « réacteurs à sels fondus » est portée par une poignée de chercheurs et enseignants-chercheurs du LPSC, récemment renforcée par une collaboration avec Subatech. Depuis une vingtaine d'années, cela a permis de développer une expertise de renommée mondiale, notamment sur l'étude prospective de réacteurs à sels fondus basés sur le cycle thorium/uranium et sur un sel fluorure. Le projet « MSFR » (« Molten Salt Fast Reactor ») est désormais connu comme « le réacteur du CNRS ».

Le domaine du nucléaire est particulièrement lié aux décisions politiques et le projet MSFR n'y échappe pas, ce qui n'est pas sans conséquence pour le projet. A une époque où il ne bénéficiait pas d'un soutien politique fort, il est clair que l'opiniâtreté du personnel impliqué a permis d'amener le projet où il en est aujourd'hui. L'IN2P3 a acquis une expertise avancée sur ce sujet qu'il serait souhaitable de pérenniser pour conserver un rôle majeur dans le domaine. Récemment, le projet a connu un regain d'intérêt à l'international, puis en France, avec l'implication récente de nouveaux partenaires (EDF, CEA, Framatome, Orano, Naarea, etc.).

Les réacteurs à sels fondus visent à changer de paradigme en utilisant un combustible liquide, ce qui modifie complètement la problématique de la sûreté nucléaire. Parmi les avantages potentiels, on peut citer : (i) les possibilités de rechargement sans arrêt du réacteur, contrairement aux réacteurs actuels, ce qui réduit considérablement les maintenances ; (ii) la possibilité de brûler les actinides mineurs produits par les réacteurs actuels, qui sont considérés comme des déchets ; ou encore (iii) une limitation sévère sinon une absence des risques d'emballement (auto-stabilisation intrinsèque).

La filière nucléaire française a récemment choisi de s'orienter vers le cycle uranium/plutonium et les sels chlorures (pour des raisons de recyclage). Les équipes de l'IN2P3 se sont adaptées à cette nouvelle donne, avec des nouveaux projets collaboratifs en cours avec les grands acteurs du domaine. Il y a cependant un certain nombre de questions

à régler, dont quelques-unes concernent la chimie. Alors qu'un matériau de cuve a bien été validé à Oak Ridge dans les années 60 pour les fluorures, cela n'est pas encore le cas pour les chlorures. La partie chimie du projet "réacteurs à sels fondus" a été évaluée en 2016 par le Conseil, et seule la partie physique est concernée par le présent rapport. Le Conseil remarque qu'il est dommage que la complémentarité entre la chimie et la physique ne puisse pas être plus appréciée en raison d'une telle séparation.

Le projet MSFR a développé une série de codes et de méthodologies couvrant divers types de réacteurs potentiels à sels fondus rapides. Les équipes de l'IN2P3 travaillent sur un concept de base, qui vise à assurer une faisabilité du concept ainsi qu'à proposer un premier dimensionnement théorique. A l'heure actuelle, l'intérêt potentiel du projet n'est plus à démontrer, mais il reste à étudier plus concrètement la faisabilité de la réalisation à long terme d'un démonstrateur avec notamment plusieurs axes de travail concernant la validation des modèles, le choix d'un matériau de cuve pour résister à la corrosion, et enfin les échangeurs de chaleur. Certaines études sont en cours via notamment le projet ISAC (validation des modèles) ou encore une thèse en cours au sujet de la corrosion (IJCLab). Il est probable qu'un démonstrateur à base de neutrons rapides ne verra pas le jour avant la deuxième moitié du XXIème siècle, mais il est important de poursuivre entre-temps les efforts sur cette thématique, et de s'assurer plus précisément de la faisabilité d'un tel projet en poursuivant les investigations.

## **7.2 Avis et recommandations**

Le Conseil félicite l'équipe « réacteurs à sels fondus » pour son dynamisme et sa constance. L'équipe porte ce projet depuis de nombreuses années et doit être accompagnée dans un paysage en mouvement qui compte désormais des acteurs clés du nucléaire en France tel que EDF, le CEA, Framatome et Orano, avec aussi la création récente de la startup Naarea, pour laquelle plusieurs personnes issues de l'IN2P3 jouent le rôle d'expert scientifique. Le Conseil recommande donc à la direction de l'IN2P3 de maintenir la position prépondérante de l'institut sur le projet MSFR, en particulier en poursuivant ses efforts en termes de moyens humains et financiers. De plus, il serait souhaitable de renforcer le dialogue entre les acteurs de l'IN2P3 et les représentants du CNRS dans les différentes missions parlementaires ou commissions dédiées à l'énergie nucléaire.

Certaines questions sont par nature pluridisciplinaires et le lien avec la chimie pourrait être renforcé, notamment sur la partie matériaux. La question de la corrosion des matériaux de cuve pour les sels chlorure doit par exemple être résolue en amont de la réalisation d'un démonstrateur éventuel, et dépasse peut-être le champ de compétences de l'IN2P3. L'organisation d'un atelier de travail au niveau du CNRS avec des représentants de l'IN2P3, de l'INC, de l'INP et de l'INSIS pourrait être une façon de nouer des liens avec d'autres acteurs du CNRS à même d'amener de nouveaux éclairages sur la question.

### Executive summary:

The Council congratulates the team "molten salt reactors" for its dynamism and constancy. The team has been carrying out this project for many years and must be accompanied in a changing landscape which now includes key nuclear players in France such as EDF, CEA, Framatome and Orano, with also the recent creation of the startup Naarea, for which several

people from IN2P3 play the role of scientific experts. The Council therefore recommends that the management of IN2P3 maintain the preponderant position of the institute on the MSFR project, in particular by continuing its efforts in terms of human and financial resources. In addition, it would be desirable to strengthen the dialogue between IN2P3 actors and CNRS representatives in the various parliamentary missions or commissions dedicated to nuclear energy.

Some questions are by nature multidisciplinary and the link with chemistry could be strengthened, particularly on the materials part. The question of the corrosion of tank materials for chloride salts must, for example, be resolved prior to the construction of a possible demonstrator, which perhaps goes beyond the scope of IN2P3. The organization of a workshop at the CNRS level with representatives of IN2P3, INC, INP and INSIS could be a way of creating links with other CNRS actors able to shed new light on the issue.

## 8. Discussions internes au CSI

### 8.1 Discussions avec la direction

Retour de la direction sur les deux séances des projets spatiaux :

La séance du CSI dédiée aux projets spatiaux à l'IN2P3 (30 juin – 1 juillet 2021) était la première à aborder spécifiquement ces thématiques, et a permis de faire un bilan sur les engagements de l'institut. L'IN2P3 est engagé depuis 25 ans sur des projets spatiaux, avec de nombreuses implications techniques. Les projets spatiaux sont à considérer en conjonction avec les projets au sol, qui ont été discutés lors d'une seconde séance (27-28 octobre 2021 sur la complémentarité sol-espace dans les recherches sur le CMB et les ondes gravitationnelles). La direction effectue ici un retour rapide sur les différents projets examinés :

- LISA : L'avis très positif du Conseil sur LISA a permis d'envoyer un message clair au CNES et à l'ESA, ce qui a aidé au passage du projet en phase B1. Le soutien de l'IN2P3 s'est traduit par le renforcement du projet avec un post-doc et un CR (L2IT), ainsi qu'un suivi régulier. Des rapprochements sur la cosmologie sont en cours au sein de GdRs. Un nouveau GDR physique cosmologique est en cours de création.
- LiteBIRD : La phase B est reportée à fin 2022 ou début 2023. Deux IRL (« International Research Laboratory » joints du CNRS) ont une thématique LiteBIRD. En 2021 il y a eu la visite de l'IJCLab par le CNES. Un soutien aux équipes avec le recrutement de doctorants a été mis en place. Il n'y aura pas de double revue organisée par l'IN2P3, car ces revues ont déjà lieu au CNES, avec un accompagnement par le DAS et DAT de l'IN2P3.
- CMB-S4 : une lettre d'intention de l'IN2P3 a été publiée en juillet 2021. L'IRL Centre Pierre Binétruy basé à Berkeley est essentiel sur ce projet. La structuration de la collaboration est en cours.
- VIRGO/ET : La direction de l'IN2P3 interagit fortement avec le ministère sur Advanced Virgo+, pour demander un financement complet en avance de la phase 2. L'IN2P3 soutient les équipes avec des thèses, post-docs, CR. La direction accompagne les discussions sur la phase post-O5. L'IN2P3 est présent dans les

comités de haut niveau de la collaboration ET. L'IN2P3 est acteur dans le montage du projet Horizon Europe Infradev.

- Euclid : L'IN2P3 soutient le retour scientifique de l'expérience via des thèses (en partenariat avec le CNES), post-docs, CR (affecté à l'APC) en 2022. S. Escoffier est coordinatrice du comité Euclid France en plus d'être responsable scientifique IN2P3 Euclid. L'IN2P3 est impliqué dans les synergies Euclid – LSST, en collaboration avec le CNES. Le CC-IN2P3 prend en charge une grande partie du calcul.
- AMS : les analyses de données sont toujours en cours. L'impact est fort mais décroissant car une seule équipe de l'IN2P3 est impliquée. La collaboration avec les théoriciens est très fructueuse.
- SVOM : L'IN2P3 soutient les équipes avec le financement de thèses et post-docs pour prendre une part importante sur l'exploitation scientifique. L'IN2P3 encourage les interconnexions avec CTA, LSST, Virgo et KM3NeT à travers les GDRs.

#### Discussion sur la séance présente :

C'est la première séance du CSI depuis 2013 sur le thème de la physique nucléaire pour l'énergie. Les exposés ont balayé un large panorama. Les questions de la direction ont été traitées en profondeur par les orateurs. Certaines recommandations des rapporteurs semblent être en accord avec les recommandations du GT11 des Prospectives de l'IN2P3.

Sur ces thématiques, un financement par projet a été mis en place : pour avoir un impact, la direction pense qu'il faut concentrer les forces sur quelques projets. La direction a réalisé qu'un certain nombre de chercheurs étaient en effet rassemblés sur un "master projet" sans qu'il s'agisse réellement d'un projet, et sans coordination. Par conséquent, un financement de base annuel aux équipes a été réintroduit, tandis que les véritables projets ont été promus en master projets. La direction réalise que le changement de structure des master projets a déstabilisé certaines équipes, mais certains chefs d'équipe sont aussi satisfaits car ils ont une plus grande marge de pilotage. Globalement, le montant total affecté aux thématiques a un peu augmenté.

Le choix a été fait dans l'élaboration du programme de ne pas examiner en séance ce qui relève de l'interdisciplinaire en liaison avec l'économie et la sociologie. Le Conseil fait remarquer qu'il y a un manque de visibilité général sur ces questions. La direction observe que l'IN2P3 n'est peut-être pas entièrement légitime pour évaluer les projets sur ces questions. P. Balcou souligne que cette évaluation pourrait avoir lieu au CS du CNRS, en collaboration avec la direction et le CSI.

#### Prochaine séance du CSI IN2P3, 23-24 juin 2022 :

La prochaine session du Conseil portera sur la thématique Calcul et Données. Cette thématique est en forte croissance et la direction pense que le moment est opportun pour examiner les activités et les projets en cours.

#### Questions diverses :

Le Conseil demande des nouvelles du rapport "Vision for GANIL" conduit par M. Spiro. Le rapport est finalisé et envoyé au PDG du CNRS ainsi qu'au CEA, qui en sont les commanditaires. Un retour sur ce rapport est attendu par l'IN2P3. Il a finalement été rendu public au mois d'avril :

<https://www.ganil-spiral2.eu/wp-content/uploads/2022/03/Expert-Committee-Vision-for-GANIL.pdf>

Le Conseil demande aussi le retour sur l'exercice de prospectives à l'IN2P3 par la direction, lequel pourrait avoir lieu lors de la séance de juin. Le document de synthèse sur l'exercice de prospectives rédigé par la direction devrait être bientôt disponible.

#### Point statutaire :

Les jurys d'admissibilité CR CID et CR section 01 sont adoptés avec deux abstentions.

## **8.2 Vie du Conseil**

### Compte rendu de la séance du 26-27 octobre 2021 sur les grand projets neutrinos :

Dans les semaines qui ont suivi la session de février 2022, le Conseil a discuté (à distance) des suites de la séance du CSI d'octobre 2021 portant sur les grands projets neutrinos à l'IN2P3. Le compte rendu mis au vote le 16 décembre 2021 avait été adopté à l'unanimité, avant d'être remis à la direction le jour même. Suite aux remarques de la direction, une modification substantielle de ce compte rendu, proposée et élaborée par le président du Conseil, a été discutée par le Conseil. Elle a été approuvée le 7 avril 2022 par 14 voix "pour", 3 voix "contre" et 5 abstentions. L'absence d'unanimité autour de cette modification est causée en particulier par un désaccord de principe sur la procédure suivie, duquel la direction a été informée, et non par un désaccord sur son contenu. La version modifiée annule et remplace celle du 16 décembre 2021.