

COMITÉ NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CONSEIL SCIENTIFIQUE D'INSTITUTC

Compte rendu

Conseil scientifique de l'IN2P3
28-29 juin 2018

(approuvé avec 21 voix exprimées : 19 pour, 2 abstention, 0 contre)

Sommaire

Sommaire	2
Membres du Conseil scientifique.....	3
Personnes présentes à la session fermée.....	3
Ordre du jour de la séance ouverte (jeudi 28 juin)	3
Remerciements aux orateurs et rapporteurs externes.....	3
Questions posées par l'IN2P3.....	3
1. Examen de projets sur le thème Neutrinos sur réacteurs et accélérateurs....	4
1.1. Introduction « Physique des neutrinos»	4
1.2. Avis général	10
1.3. Expérience JUNO et bilan de Double-Chooz	13
Avis et recommandations	14
1.4. Expérience DUNE.....	15
Avis et recommandations	16
1.5. Expériences T2K, T2K-II, SK et HK.....	16
Avis et recommandations	17
1.6. Expérience STEREO.....	18
Avis et recommandations	19
1.7. Expérience SoLiD.....	19
Avis et recommandations	20
2. Vie du conseil.....	21
2.1. Compte-rendu.....	21
2.2. Fonctionnement du conseil	21
2.3. Échange avec la direction.....	21
2.4. Futur conseil.....	23

Membres du Conseil scientifique

Présents : J.C. Angélique, M. Baylac, B. Blank, Y. Blumenfeld, D. Boutigny, E. Clément, W. Da Silva, D. Douillet, D. Duchesneau, B. Farizon, P. Gay, T. Hebbeker, F. Kapusta, C. Landesman, P. Manigot, C. Renault, M. Ridet, P. Van Duppen, D. Vincent

Excusés : M. Jacobé de Naurois, A. Masiero, A. Monfardini, M.-H. Schune, K. Werner

Personnes présentes à la session fermée

Direction de l'institut : F. Farget, B. Giebbels, P. Verdier

Orateurs et associés : D. Autiero, M. Bongrand, A. Cabrera, C. Giganti, B. Guillon, M. Gonin, M. Dracos, J. Martino, T. Patzak, A. Stutz, F. Yermia, M. Zito

Rapporteurs externes : I. G. Botella (CIEMAT Madrid), A. Blondel (Université de Genève), A. Ereditato (LHRP Berne), F. Terranova (INFN Milano)

Ordre du jour de la séance ouverte (jeudi 28 juin)

- Introduction du conseil : *Dominique Duchesneau (LAPP Annecy-le-Vieux)*
- Introduction « Physique des neutrinos » : *Stéphane Lavignac (IPhT, Saclay)*
- Expérience JUNO et bilan de Double-Chooz : *Anatael Cabrera (APC Paris)*
- Expérience DUNE : *Dario Autiero (IPNL Lyon)*
- Expériences T2K, T2K-II, SK et HK : *Claudio Giganti (LPNHE Paris) et Michel Gonin (LLR Palaiseau)*
- Expérience STEREO : *Anne Stutz (LPSC Grenoble)*
- Expérience SoLiD : *Benoit Guillon (LPC Caen)*

Ordre du jour, documents préparatoires et présentations publiques disponibles sur le site de l'IN2P3 : <http://www.in2p3.fr/actions/conseilsscientifiques/conseils.htm>

Remerciements aux orateurs et rapporteurs externes

Le conseil remercie les orateurs pour la qualité et la clarté de leur rapport écrit et de leur exposé concernant les différents projets présentés lors de ce conseil. Le conseil remercie également les rapporteurs pour leur travail et la pertinence de leurs contributions sur les projets étudiés par le conseil.

Questions posées par l'IN2P3

- *Quelles sont les principales spécificités (points forts/points faibles) de la contribution de l'institut, vis-à-vis des autres organismes français et internationaux, dans ces expériences et projets ?*
- *Comment les projets présentés s'inscrivent-ils dans la durée ?*
- *Comment les expériences répondent-elles aux questions théoriques ?*
- *Quelle est la cohérence scientifique des activités au niveau national ? Peut-on l'améliorer ?*
- *Comment les expériences « réacteurs » et « accélérateurs » se complètent-elles ?*
- *Y a-t-il des problèmes relatifs au calcul ou au stockage des données ?*

1. Examen de projets sur le thème Neutrinos sur réacteurs et accélérateurs

1.1. Introduction « Physique des neutrinos »

Le sujet de ce conseil est l'étude des neutrinos par des expériences installées auprès de sites de production de neutrinos, à savoir des réacteurs nucléaires et des accélérateurs de particules. Les recherches sur les neutrinos relevant du domaine des astroparticules, concernant les neutrinos reliques de l'univers primordial, les neutrinos cosmiques ou les neutrinos produits par les supernovae, ou encore la recherche de double désintégration beta sans émission de neutrino ne sont pas évaluées lors de ce conseil.

Parmi les particules élémentaires, les neutrinos sont à part : ce sont les seuls fermions à n'être sensibles qu'à l'interaction faible (en plus de la gravitation) et leur section efficace d'interaction est extrêmement petite. Cette particularité peut être vue comme un défaut puisqu'elle rend leur détection particulièrement difficile ; c'est aussi une qualité qui leur permet de jouer un rôle unique dans le domaine de l'astronomie multi-messagers car ils peuvent parcourir de très grandes distances sans interagir ni être déviés ou s'extraire d'objets très compacts. Ils s'avèrent donc précieux pour étudier les sources du rayonnement cosmique ou l'explosion des supernovae notamment. S'ajoutent leur masse, non nulle mais extrêmement petite, et le fait qu'ils changent de saveur au cours de leur propagation.

Les neutrinos sont avant tout intéressants pour leurs propriétés fondamentales, en lien avec la théorie qui gouverne les particules élémentaires et leurs interactions. En effet, la valeur non nulle de leur masse déduite de l'observation de leur oscillation est l'un des écueils du Modèle standard de la physique des particules, avec la matière noire, l'énergie noire, l'asymétrie matière-antimatière et l'inflation primordiale.

Le fait que les neutrinos soient électriquement neutres (ou plus exactement qu'ils ne portent aucun nombre quantique additif conservé) leur permet, au moins en principe, d'être leurs propres antiparticules, c'est-à-dire d'être des fermions de Majorana avec un nombre leptonique violé. Nous ne savons toujours pas si c'est le cas ou si, comme les quarks et les leptons chargés, ce sont des fermions de Dirac avec un nombre leptonique conservé. Seule l'observation d'un processus dans lequel le nombre leptonique est violé de deux unités, comme la double désintégration bêta sans émission de neutrino, permettrait de trancher entre ces deux possibilités en mettant en évidence la nature de fermions de Majorana des neutrinos.

S'il y a violation du nombre leptonique à une échelle d'énergie très élevée, alors les masses des neutrinos seraient liées à une nouvelle physique à l'échelle d'unification des couplages de jauge. Celle-ci pourrait également être à l'origine de l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers via le mécanisme de leptogénèse. Cette possibilité est suggérée par certaines théories de Grande Unification qui contiennent des neutrinos de Majorana superlourds qui engendrent de petites masses de Majorana pour les neutrinos du modèle standard. Si leurs couplages aux leptons violent la symétrie CP, ces neutrinos superlourds créent en se désintégrant une asymétrie entre le nombre de leptons et d'antileptons : l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers pourrait en être la conséquence.

En ce qui concerne les expériences, la physique des neutrinos a connu des avancées remarquables depuis une vingtaine d'années. Les oscillations ont été mises en évidence avec diverses sources - neutrinos atmosphériques, neutrinos produits par le Soleil, des accélérateurs de particules ou des réacteurs nucléaires - et avec diverses techniques. Les

canaux d'oscillation $\nu_e \rightarrow \nu_e$ et $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ pour la disparition, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ et $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ pour l'apparition ont été observés avec des sources artificielles, et la dépendance en longueur/énergie de la probabilité de survie a été mise en évidence par plusieurs expériences de disparition. Les différences de carrés de masse Δm_{21}^2 et Δm_{31}^2 et les angles de mélange θ_{12} , θ_{23} et θ_{13} sont mesurés avec une précision croissante au cours du temps. Des signes en faveur d'une éventuelle violation de la symétrie CP dans les oscillations semblent avoir été observées par l'expérience T2K et sont actuellement recherchés par l'expérience Nova.

Deux phénomènes observés de façon récurrente par les expériences neutrinos auprès des réacteurs ne peuvent être expliqués par le phénomène d'oscillation ; ils sont connus sous le nom d'anomalie des neutrinos de réacteurs (RAA ou Reactor Antineutrino Anomaly). La première anomalie consiste en un déficit moyen de 6,5% du flux d'antineutrinos électroniques attendus à proximité d'un réacteur. À ce déficit s'ajoute une distorsion, observée notamment par les détecteurs de Double Chooz, Daya Bay et RENO, dans le spectre en énergie des neutrinos mesuré avec un excès d'évènements autour de 5 MeV. Deux hypothèses pourraient expliquer ce déficit :

- une sous-estimation du flux d'antineutrinos électroniques émis par les réacteurs ;
- l'existence d'un nouvel état du neutrino, un neutrino stérile de masse de l'ordre de l'électron-volt. Un neutrino stérile n'interagit pas avec la matière par interaction faible mais participe comme les autres neutrinos aux oscillations, ce qui pourrait expliquer un déficit par la transformation des antineutrinos électroniques attendus en antineutrinos stériles.

Cette dernière possibilité est toutefois défavorisée par les observations cosmologiques qui sont compatibles avec trois saveurs de neutrinos légers et fournissent une limite supérieure sur la somme des masses des neutrinos. Les contraintes actuelles fournies par la collaboration Planck sont sévères : $N_{\text{eff}} = 3.15 \pm 0.23$ à 68% de niveau de confiance en ce qui concerne le nombre effectif de degrés de liberté relativistes, et, en l'absence de neutrino stérile, $\Sigma m < 0.17$ eV à 95% de niveau de confiance pour la somme des masses des neutrinos. Toutefois ces contraintes dépendent du modèle cosmologique et des données considérées.

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

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

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

Expérience JUNO et bilan de Double-Chooz

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

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

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

Le concept de JUNO est très ambitieux - et donc non sans risque ; le détecteur sera constitué d'un calorimètre de plus de 20 000 tonnes de scintillateur liquide, de 43 000 tubes photomultiplicateurs (PMT) et de sous-détecteurs spéciaux tels que le détecteur de traces supérieur. JUNO sera le plus grand et le plus sensible des détecteurs à scintillateur liquide pour de nombreuses années.

Expérience DUNE

Le projet très ambitieux DUNE a plusieurs objectifs scientifiques :

- réaliser une mesure de précision des oscillations de neutrino ν_μ et anti- ν_μ sur une longue distance afin de déterminer la phase δ -CP où une valeur différente de 0 ou π serait la première manifestation de violation de CP dans le secteur leptonique ;
- déterminer la hiérarchie de masse des neutrinos ;
- mesurer l'angle de mélange Θ_{23} ;
- rechercher la décroissance du proton ;
- mesurer le flux de ν_e produits par les supernovae dans notre Galaxie.

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

Le développement d'une TPC à argon liquide de 10 000 tonnes dite « dual phase » ou double phase, c'est-à-dire comprenant une phase liquide de détection et une phase gazeuse servant à amplifier le signal est l'une des réalisations techniques principales dans laquelle les laboratoires IN2P3 se sont impliqués. La conception et la réalisation d'une telle TPC est un défi majeur du projet DUNE. Associée au milieu de détection, une importante R&D sur les hautes tensions, le passage air-cryogénie des signaux et le traitement du signal sont également des activités importantes.

Le projet de TPC argon liquide double phase en développement pour DUNE est l'aboutissement d'une très longue phase de R&D qui a débuté en 2008 dans le cadre des programmes LAGUNA et LAGUNA-LBNO. Le projet initial prévoyait une exploitation auprès du SPS au CERN.

La première phase de R&D a été soutenue par le CERN Research Board et l'IN2P3 prévoyait la construction d'un prototype 6x6x6 m³ dans l'aire expérimentale nord du CERN sous l'appellation WA105.

L'internationalisation du projet en collaboration avec la communauté américaine a recentré la phase de R&D au CERN alors que l'exploitation en tant que telle sera faite au Fermilab. Ce nouveau projet international a pris le nom de DUNE, absorbant l'expérience WA105, renommée ProtoDune dual-phase dont la construction devrait se terminer fin 2018. En parallèle, un prototype de plus petit volume (3x1x1 m³) a été assemblé entre 2015 et 2016 au CERN et a acquis des données de rayonnement cosmique de juin à novembre 2017. Le retour d'expérience de ce prototype est que les défis techniques sont la construction du plan de collection de charges dont les contraintes mécaniques, en milieu cryogénique, sont importantes. Le second défi est la collection de charges et de lumière en utilisant des ASIC en milieu cryogénique ainsi que la digitalisation et la synchronisation d'un nombre important de voies électroniques. Le troisième défi porte sur la gestion des données de simulation et d'expérience. Une organisation comparable à celle des expériences auprès du LHC est proposée. Enfin, la mise à niveau du faisceau de protons du Fermilab est nécessaire, impliquant là aussi plusieurs laboratoires français.

Expériences T2K, T2K-II, SK et HK

L'expérience T2K est une expérience d'oscillations des neutrinos de type LDB située au Japon ; elle a été conçue pour étudier et mesurer précisément les oscillations neutrinos se produisant entre le complexe d'accélérateur J-PARC et le détecteur Super-Kamiokande (SK) situé à 295 km de la source de neutrinos.

L'objectif est d'étudier la transformation des neutrinos muoniques du faisceau en neutrinos électroniques, ainsi que la même transformation avec des antineutrinos.

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

T2K a commencé ses prises de données en 2010. Après avoir obtenu en 2011 les premières indications de l'existence de la transition $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ et d'une valeur non nulle de l'angle de mélange θ_{13} , T2K a définitivement prouvé l'apparition de ν_e par oscillation en 2013 avec une signification statistique supérieure à 7σ .

Des équipes de l'IN2P3 ont été fortement impliqués dans l'opération, les étalonnages et l'analyse des données de T2K. Les contributions principales ont été INGRID, WAGASCI, ND280, l'analyse des oscillations et la participation active à l'expérience de production de hadrons NA61/SHINE en vue de réduire les erreurs systématiques sur la connaissance des flux de neutrinos du faisceau.

La valeur relativement grande de θ_{13} a ouvert la possibilité de chercher à observer la violation de CP dans le secteur des leptons en utilisant des faisceaux de ν_μ et anti- ν_μ et en comparant les probabilités d'apparition de ν_e et d'anti- ν_e . C'est ainsi que T2K a pu récemment exclure les valeurs de la phase δ conservant CP à plus de 2σ et a préféré une valeur de δ de $-\pi/2$.

Ces observations ont amené le Japon à définir un programme par étapes utilisant l'expérience T2K jusqu'en 2021 avec les performances actuelles pour atteindre $7.8 \cdot 10^{21}$ protons-sur-cible (p.o.t.) puis à faire une amélioration de l'accélérateur pour atteindre 1.3 MW de puissance ainsi qu'une amélioration du détecteur proche ND280 pour permettre en 2026 d'accumuler $2 \cdot 10^{22}$ p.o.t. et d'exclure $\delta_{CP}=0$ jusqu'à éventuellement 3σ . Cette phase est appelée T2K-II.

Au-delà de cette phase, le projet serait de construire un futur détecteur lointain Hyper-K (HK) dont le volume fiduciel serait 8 fois celui de SK pour observer une mesure de la violation de CP avec une signification pouvant dépasser 5σ selon la valeur de δ_{CP} .

Dans ce contexte de programme étagé, des équipes de l'IN2P3 envisagent de participer à la phase d'amélioration de T2K-II, notamment sur le détecteur proche ND280. Pour parvenir à l'objectif scientifique il est nécessaire de contrôler plus précisément certaines sources d'erreurs systématiques liées aux flux de neutrinos et aux sections efficaces. Les modifications proposées sur ND280 sont un nouveau détecteur à granularité fine (Super-FGD) et de nouvelles TPC horizontales.

Expérience STEREO

L'expérience STEREO se situe à 10,3 m du cœur du réacteur de recherche de l'Institut Laue Langevin (ILL) de Grenoble qui est une source d'antineutrinos. Ce réacteur n'utilise presque un seul isotope de l'uranium, ^{235}U , contrairement aux réacteurs commerciaux. Cette caractéristique est importante pour diminuer les erreurs systématiques associées à l'évolution du combustible. L'objectif de STEREO est de tester les deux hypothèses permettant d'expliquer les deux phénomènes observés de façon récurrente par les expériences neutrinos auprès des réacteurs et appelés RAA : une sous-estimation du flux

d'antineutrinos électroniques émis par le réacteur ou l'existence d'un nouvel état du neutrino, le neutrino stérile avec une masse de l'ordre de l'eV.

Le détecteur STEREO se compose de 6 segments de liquide scintillant dopé au Gadolinium sur 2,4 m de long permettant de tester la gamme des longueurs d'oscillation favorisée par les mesures existantes. En effet, de fortes contraintes existent sur le neutrino stérile qui pourrait expliquer le déficit connu relativement précisément. Le meilleur ajustement sur les données pointait vers un neutrino stérile avec une différence de masse $\Delta^2 m_{\text{new}}$ de 2.3 eV² et un angle de mélange tel que $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) = 0.17$. La détection des antineutrinos se fait par une réaction de désintégration β inverse induite par l'interaction d'un antineutrino sur un proton du scintillateur. La signature de l'interaction se fait par la détection en temps de deux dépôts d'énergie correspondant au positron et au neutron émis. La reconstruction de signal se fait à une seule dimension.

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

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

Il faut noter que les expériences NEOS et DANSS ont publié de nouveaux résultats excluant, comme STEREO, ce même point. Leurs données sont compatibles avec un nouveau meilleur ajustement pour un neutrino stérile tel que $\Delta^2 m_{\text{new}} = 1.3$ eV², $\sin^2(2\theta_{\text{new}}) = 0.049$. Atteindre ce point de l'espace des paramètres sera un défi pour STEREO. L'analyse des nouvelles données, pour lesquelles le détecteur a été beaucoup plus stable, est donc très attendue.

Expérience SoLiD

SoLiD est une expérience neutrinos auprès d'un réacteur, elle a été proposée pour contribuer à la clarification d'un ensemble d'anomalies (RAA, gallium, LSND/MiniBooNE) qui, potentiellement, pourrait indiquer l'existence d'un neutrino stérile avec une masse autour de 1 eV et un couplage assez fort avec les autres neutrinos. Rechercher des oscillations de neutrinos en utilisant les antineutrinos produits par un réacteur nécessite une installation avec une très courte ligne de base. Ainsi, le détecteur SoLiD est placé près du cœur en ²³⁵U pur à 95% du réacteur de recherche BR2 en Belgique au SCK-CEN. Il permet de couvrir une distance comprise entre 6 et 9 m.

Le principe de détection de SoLiD est basé sur la décroissance inverse-bêta. L'utilisation de détecteurs cubiques à scintillation en plastique solide de type PVT permet la lecture d'un signal lumineux à 3 dimensions. De plus, les cubes de scintillateurs sont partiellement en contact avec des écrans faits de scintillateur ⁶LiF:ZnS(Ag) afin de mettre en évidence la capture de neutrons retardés.

Après l'installation et les tests, l'expérience a commencé sa prise de données en février 2018 et prévoit de poursuivre sur une période de trois ans, donc jusqu'à début 2021 afin de

collecter suffisamment de statistique et d'obtenir une mesure presque dominée par les erreurs systématiques. SoLiD espère être en mesure de rivaliser avec DANNS et NEOS et devrait fournir une détection et une analyse complémentaires de celles de l'expérience STEREO.

1.2. Avis général

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

La connaissance détaillée des propriétés de neutrinos nécessitent :

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

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

Des informations complémentaires et les avis détaillés sont présentés dans les sections suivantes, pour chaque projet. Le conseil répond ici aux questions posées par l'institut de façon synthétique.

- *Quelles sont les principales spécificités (points forts/points faibles) de la contribution de l'institut, vis-à-vis des autres organismes français et internationaux, dans ces expériences et projets ?*

Des chercheurs de l'IN2P3 ont su efficacement tirer profit de la proximité de réacteurs riches en ^{235}U , à Grenoble ou en Belgique, pour apporter une réponse rapide à l'énigme de la RAA en montant les projets STEREO et SoLiD. STEREO a déjà apporté une première réponse, avec ainsi une excellente visibilité.

Les Français jouent un rôle majeur et mineur dans les projets STEREO et SoLiD. Les points forts pour ces expériences résident dans l'expertise sur la physique de réacteurs, la maîtrise des technologies employées et l'exploitation des réacteurs de recherche situés en France et en Belgique. Les autres expériences de neutrinos stériles sur réacteurs exploitent des réacteurs commerciaux dont les combustibles sont différents (moins riches en ^{235}U) et dont la taille du cœur dilue plus la précision sur la position de la production des neutrinos.

Pour JUNO, T2K, T2K-II et DUNE les Français sont présents sur des volets clés de l'expérience. Leurs contributions sont significatives et clairement adaptées à leur expertise. Les contributions choisies donnent une grande visibilité dans les phases de conception.

- *Comment les projets présentés s'inscrivent-ils dans la durée ?*

En ce qui concerne la RAA, cette hypothèse est explorée par des expériences de réacteurs et de sources, dont STEREO et SoLiD, qui devraient conclure dans les 2 à 3 prochaines années. Ces expériences devraient permettre de confirmer ou infirmer l'anomalie réacteurs.

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

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

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

- *Comment les expériences répondent-elles aux questions théoriques ?*

Les expériences sur réacteur ou sur accélérateur présentées lors de ce conseil ont pour objectif de répondre à une ou plusieurs des questions majeures présentées en introduction. Les expériences revues concernent essentiellement l'étude des propriétés des neutrinos par le mécanisme d'oscillation et tentent de déterminer les divers paramètres grâce à des expériences dans différents régimes de distance et d'énergie :

- sur réacteurs (JUNO 53 km, STEREO 10 m, Solid 8 m)
- sur faisceau de ν_μ produit par accélérateur : T2K et HK (295 km, 0.7 GeV); DUNE (1300 km, 2 GeV)

S'ajoute le potentiel de ces expériences à explorer des sources au-delà des neutrinos produits par ces machines :

- atmosphériques (SK, JUNO, DUNE, HK)
- Soleil (JUNO)
- explosion de supernovae (JUNO, DUNE, HK)
- désintégration de nucléon (JUNO, DUNE, HK).

L'anomalie des réacteurs repose largement sur le spectre de l' ^{235}U déterminé par Schreckenbach d'après des données des années 80. Au-delà de la vérification de l'excès autour de 5 MeV, le conseil soutient fortement la mesure du spectre en énergie des

neutrinos par les collaborations STEREO et SoLiD afin de raffiner cette information de base et ainsi mieux cerner la RAA. C'est essentiel pour progresser sur le cas scientifique du neutrino stérile.

- *Quelle est la cohérence scientifique des activités au niveau national ? Peut-on l'améliorer ?*

Les membres des collaborations STEREO et SoLiD possèdent une expertise et une force de frappe qui risquent de se perdre si chacun choisit un avenir de façon isolée. Le GdR Neutrinos pourrait abriter une discussion sur l'opportunité de déplacer l'un de ces détecteurs, ou les deux, ou sur l'opportunité de participer au détecteur proche de JUNO par exemple.

En ce qui concerne les autres projets de plus longue durée, les moyens disponibles semblent raisonnablement correspondre aux besoins, dix laboratoires participent à l'un de ces projets, seul l'APC (et le pôle OMEGA) participe à la fois à JUNO et DUNE mais il est "spécialisé" dans les astro-particules, c'est donc assez naturel. Trois laboratoires sont uniquement engagés actuellement dans les projets neutrinos de courte durée. Le conseil s'interroge sur le Laboratoire neutrino de Champagne Ardenne qui n'a pas été évoqué lors de ce conseil.

- *Comment les expériences « réacteurs » et « accélérateurs » se complètent-elles ?*

Les expériences à courte ligne de base auprès des réacteurs dédiées à la confirmation ou l'infirmité qu'un neutrino stérile expliquerait les RAA sont indépendantes des projets sur accélérateurs revus lors de ce conseil. En revanche, elles complètent les projets sur réacteurs qui ont mis en évidence cette RAA.

Les expériences sur réacteurs sont complémentaires de celles sur accélérateurs pour la recherche des neutrinos stériles de masse de l'ordre de 1 eV. Les paramètres d'oscillations de ces neutrinos ne peuvent pas être couverts de manière aussi complète par les expériences accélératrices.

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

- *Y a-t-il des problèmes relatifs au calcul ou au stockage des données ?*

Même les projets modestes tels que SoLiD ont à gérer un volume de données non négligeable. Les projets de grande envergure tels que JUNO ou DUNE doivent faire face à un flux de données proche de celui des expériences auprès du LHC. Si le CC-IN2P3, fortement sollicité par ces projets, est a priori apte à faire face à ses demandes, une étroite coordination entre le projet et les responsables du centre de calcul est indispensable pour garantir l'efficacité requise.

1.3. Expérience JUNO et bilan de Double-Chooz

La collaboration JUNO comprend environ 20 instituts européens, beaucoup d'entre eux étant déjà impliqués dans le projet de neutrinos de réacteur Double-Chooz qui a mesuré l'angle de mélange Θ_{13} . Cinq laboratoires français participent à JUNO : l'APC, le CENBG, le CPPM, l'IPHC, SUBATECH avec le soutien du laboratoire OMEGA. Avec une quarantaine de physiciens, doctorants, post-doctorants et ingénieurs, l'équipe française de JUNO, qui représente 6.5 % de la collaboration, est forte et visible. Elle apporte des expertises variées, de l'électronique des détecteurs aux analyses astrophysiques, avec notamment l'expérience acquise sur Double-Chooz. Les groupes français ont des contributions substantielles, en particulier dans le domaine instrumental et dans le domaine des diverses analyses physiques et de leur préparation :

- le calorimètre, et notamment le système SPMT des petits photomultiplicateurs. Basé sur 25 000 PMT de 3", il permet une calorimétrie double, dites stéréo. Ce concept, développé et proposé par les groupes français, permet d'améliorer la résolution en énergie. Le CNRS est responsable de l'électronique de lecture et jouera un rôle majeur dans les mesures d'énergie et la détermination de la hiérarchie de masse ;
- le détecteur de traces supérieur. Issu de l'expérience OPERA, il est utilisé pour l'étude et la réjection du bruit de fond produit par le rayonnement cosmique. C'est la principale contribution en nature et financière de la France à l'expérience JUNO ;
- la réjection active du bruit de fond produit par la radioactivité et induit par les muons atmosphériques grâce à une reconnaissance de forme ;
- les paramètres d'oscillations des neutrinos solaires en utilisant les neutrinos de réacteur. La précision sur l'angle de mélange correspondant Θ_{12} et sur la différence de masse δm^2 peut être améliorée d'un facteur cinq par rapport à nos connaissances actuelles ;
- les supernovae. Grâce à l'énorme volume fiduciel de son détecteur, tout effondrement stellaire en supernova dans notre galaxie peut être détecté. Toutefois le taux attendu ne dépasse pas un événement tous les 30 à 50 ans.

Les aspects calcul de JUNO dans le cadre européen sont encore en discussion ; les groupes français ont un fort intérêt à jouer un rôle majeur ici aussi.

Les risques liés à l'objectif principal, à savoir la détermination de la hiérarchie de masse, sont liés aux questions suivantes :

- ce détecteur à scintillateur liquide, qui est plus d'un ordre de grandeur plus grand que son prédécesseur, fonctionnera-t-il comme prévu ?
- la résolution en énergie de 3% peut-elle être effectivement atteinte ?
- le spectre des neutrinos non-oscillants issus du réacteur est-il suffisamment bien connu ?
- doit-on craindre un décalage du calendrier tel que d'autres expériences précéderaient JUNO en mesurant la hiérarchie de masse précisément ?

Avis et recommandations

Les principaux points forts de la contribution française sont une solide expertise suite à l'expérience acquise avec Double-Chooz et OPERA ainsi qu'un rôle majeur dans le SPMT ainsi qu'en électronique et dans le trajectographe supérieur (TT). Le programme d'analyse est excellent et les équipes sont très visibles dans JUNO.

Le point faible de la contribution française est que l'accès aux données et les moyens de calcul ne sont pas clairement définis puisqu'il n'y a pas actuellement d'accord formel entre le CNRS et la collaboration JUNO spécifiant les conditions d'accès aux données.

Des mesures pour connaître la hiérarchie de masse seront également réalisées par d'autres expériences en parallèle de JUNO. Les nouvelles expériences à longue ligne de base telles que DUNE et HK auront des résultats ultérieurement mais avec une meilleure précision. JUNO doit donc être aussi rapide que possible pour être compétitif. En ce qui concerne les autres objectifs, en particulier les paramètres de mélange, JUNO n'a pas de compétiteur et prendra donc des données durant de nombreuses années. Par ailleurs le programme supernovae nécessite une expérience de longue durée en raison de la rareté des événements.

À la fois la hiérarchie de masse et les valeurs précises des paramètres de mélange sont nécessaires pour compléter le cadre théorique de la physique des neutrinos.

Les cinq laboratoires du CNRS travaillant dans le projet JUNO sont tous impliqués dans les deux projets instrumentaux français majeurs et indépendants : quatre dans le SPMT et deux dans le TT, le CENBG contribuant aux deux. La collaboration au sein des deux projets semble satisfaisante.

Les expériences sur réacteur et sur accélérateur sont complémentaires ; la violation de CP ne peut être mesurée qu'avec les expériences sur accélérateur alors que l'expérience sur réacteur JUNO permettra d'atteindre une plus grande précision sur certains paramètres de mélange tels que l'angle θ_{12} . Des valeurs précises des angles de mélange sont requises pour interpréter les mesures de violation de CP faites par les expériences sur accélérateur.

JUNO présente un défi de taille moyenne en termes de calcul, avec un volume annuel de données expérimentales estimé à 2 PB. Alors que la prise de données devrait débuter en 2021, d'ici trois ans donc, il est absolument indispensable de mettre en place dès maintenant l'infrastructure apte à prendre en charge ces besoins en calcul, incluant une liaison rapide entre JUNO et l'Europe. Le renfort par un expert en calcul, soit au CC-IN2P3, soit dans un autre laboratoire français est également essentiel.

La participation française à JUNO est un excellent projet. Les équipes doivent continuer à travailler sur le prestigieux projet SPMT, initié en France, sur le trajectographe supérieur, sur la reconstruction du bruit de fond et sur la préparation de l'analyse des données, recherche de supernovae incluse. Le système SPMT jouera un rôle central en maintenant basses les erreurs systématiques sur l'analyse du spectre en énergie.

En ce qui concerne l'analyse des données, les groupes français se concentrent aussi sur les mesures d'angle de mélange, et pas uniquement sur la détermination de la hiérarchie de masse. C'est appréciable car JUNO pourrait ne pas jouer le rôle majeur initialement prévu sur ce sujet.

Dès lors que JUNO repose sur une connaissance précise et détaillée du spectre en énergie des neutrinos “brut”, à la sortie du réacteur, sa mesure par un détecteur de proximité est très importante. La France devrait envisager de contribuer également à ce détecteur de proximité, avec des experts français supplémentaires qui rejoindraient la collaboration sans compromettre les sous-projets actuels dans JUNO.

1.4. Expérience DUNE

Les groupes de l'IN2P3 ont déjà une forte contribution à DUNE, de l'ordre de 30 équivalent-temps-plein (ETP) répartis de façon équilibrée entre physiciens et ingénieurs. La contribution se concentre sur les prototypes de détecteur à argon liquide double phase ainsi que sur des rôles de coordination dans la collaboration. Les principales contributions instrumentales de l'IN2P3 à la construction du prototype WA105 double phase sont :

- l'électronique de lecture de lumière par l'APC, OMEGA et le LAPP ;
- l'électronique analogique et digitale de charge, l'acquisition de données et le calage en temps, l'informatique en ligne et de stockage par l'IPNL ;
- la mécanique des plans de lecture de charge et l'instrumentation du faisceau par le LAPP ;
- les passages haute tension - cathode par le LPNHE qui n'a finalement pas rejoint la collaboration DUNE.

Afin de sécuriser le financement français de DUNE pour le long terme, un projet d'infrastructure de recherche (IR) a été déposé. En mars dernier DUNE a été inclus dans la feuille de route des infrastructures de recherche nationales.

Le travail sur les prototypes et l'inclusion de DUNE dans la feuille de route constituent un socle solide pour la future contribution de l'IN2P3 à DUNE. Une participation à la construction des éléments cités ci-dessus en électronique, mécanique et acquisition de données est attendue. La contribution du CC-IN2P3 devrait aussi monter en puissance et le centre de calculs pourrait devenir un Tiers1 ou un Tiers2. Un projet informatique DUNE est ainsi en cours d'élaboration dans le cadre d'une collaboration entre les groupes de l'IN2P3, du CEA et le CC-IN2P3.

Les groupes de l'IN2P3 prévoient également une forte participation aux analyses, en particulier la recherche de la violation de CP, la hiérarchie de masse, les événements de rayons cosmiques, la décroissance du proton, les oscillations neutron-antineutron et les neutrinos produits par les supernovae.

Un renforcement de la participation française est attendu par l'agrandissement des groupes actuels et l'adjonction de nouveaux acteurs. Le LAL en particulier a déclaré son intérêt dans la mécanique, l'électronique et l'acquisition du détecteur double phase. Le LAL, l'IPNO et l'IRFU souhaitent de plus contribuer à la source de protons pour l'accélérateur. Le LAL et l'IPNO ont également l'expertise pour la conception et la réalisation de cryo-modules pour l'accélérateur mais leurs équipes n'ont pas de disponibilités avant au moins un an. Ils pourraient néanmoins rapidement entamer une R&D sur les états de surface des cavités.

Avis et recommandations

Les choix technologiques sur lesquels se sont portés les équipes françaises sont ambitieux et très attractifs. La contrepartie est qu'ils comportent des risques élevés.

L'extrapolation au détecteur final de grand volume comporte des risques et des difficultés inévitables. La phase de tests sous faisceau ne permettra la vérification que du prototype simple phase. Le prototype double phase sera testé sous rayons cosmiques uniquement, avant la construction des premiers détecteurs de DUNE. Ces tests avec le rayonnement cosmique permettront de vérifier tous les aspects de mise en œuvre et le fonctionnement du prototype.

Les avantages techniques du détecteur double phase par rapport au détecteur simple phase ont été présentés et sont convaincants. Néanmoins les gains de physique du double phase n'ont pas été suffisamment quantifiés dans le document fourni. L'amélioration à 2.4 MW du faisceau du FERMILAB est un objectif ambitieux qui n'est pas encore approuvé par la DOE.

Avec son panorama large, la haute précision promise et l'image globale qu'il va donner avec l'utilisation de faisceaux à spectre large, DUNE apportera des informations cruciales avant tout sur la question fondamentale de la violation de CP dans le secteur leptonique et sur l'établissement de la hiérarchie de masse des neutrinos, mais aussi sur la possible observation de neutrinos provenant de supernovae et sur la décroissance du proton. Néanmoins la participation française dans DUNE ne doit pas occulter l'importance pour l'IN2P3 de conserver un rôle actif dans les programmes japonais (T2K, SK et dans le futur HK). L'engagement des groupes IN2P3 sur les programmes scientifiques de DUNE doit être optimisé au regard des gains scientifiques attendus vis à vis des autres programmes. Le conseil recommande que soit détaillés, lors d'une prochaine session, les programmes scientifiques dans lesquelles les groupes français souhaitent être le plus impliqués.

Le conseil invite à la vigilance sur les tests du double phase. Bien qu'une solution à quatre modules simple phase dans DUNE, au lieu d'un mélange double phase - simple phase, ne devrait pas limiter au premier ordre les résultats scientifiques, la contribution des équipes françaises en serait affectée et par conséquent la visibilité scientifique française diminuée. Le conseil recommande de sécuriser formellement l'implication au sein de la collaboration DUNE et la visibilité scientifique des chercheurs de l'IN2P3.

1.5. Expériences T2K, T2K-II, SK et HK

Les participations proposées par les laboratoires de l'IN2P3 concernent :

- le développement par le LLR de l'électronique de lecture des Super-FGD avec une proposition alternative basée sur l'expérience acquise dans le cadre de ILC/Calice ;
- la mécanique et l'intégration des Super-FGD par le LLR ;
- le développement par le LPNHE de l'électronique frontale des nouvelles TPC horizontales. Cette électronique serait semblable à celle déployée pour les TPC actuelles de ND280;
- l'intégration de la TPC par le service mécanique du LPNHE.

Au-delà des améliorations de ND280, le LPNHE poursuit les activités d'analyse en vue de la réduction des erreurs systématiques à travers le programme NA61/SHINE et le LLR a engagé un programme d'activités auprès de SK.

Le LLR a rejoint SK en 2016 et devrait participer à la nouvelle phase de l'expérience quand le détecteur sera remis en état et inclura du Gadolinium. Le groupe compte s'impliquer entre autres dans des études liées au fond diffus de neutrinos de supernovae.

Finalement, les deux laboratoires montrent un intérêt à contribuer au projet HK et soulignent une possible contribution à l'électronique frontale des PMTs de 20" ainsi que pour une contribution à la R&D sur une alternative de photo-détecteurs basée sur l'option multi-PMTs.

Avis et recommandations

T2K et T2K-II:

Les groupes IN2P3 ont joué un rôle majeur dans le projet T2K à travers leurs participations à la construction et l'exploitation des détecteurs proches dès le début. Ils ont apporté une contribution notoire dans les analyses d'oscillation de T2K ainsi que dans les études de hadro-production avec le projet NA61/SHINE qui ont permis d'améliorer les prédictions des flux de neutrinos et ainsi contribuer à réduire les erreurs systématiques pour les mesures fondamentales de T2K.

Les premiers indices d'une possible violation CP et le potentiel du projet dans le contexte mondial avec l'expérience Nova et dans une fenêtre de temps inférieure à 10 ans justifie la poursuite de l'exploitation de T2K de manière à augmenter significativement la statistique selon le programme proposé. Dans un premier temps, le programme approuvé de T2K va permettre d'atteindre l'intensité nominale de $7.8 \cdot 10^{21}$ p.o.t. d'ici 2021, ce qui doublera la statistique. Puis, dans la phase II proposée par la collaboration, la montée en puissance de l'accélérateur de J-PARC et les améliorations envisagées pour les détecteurs proches permettront de poursuivre l'investigation de la violation CP avec $20 \cdot 10^{21}$ p.o.t. d'ici 2026 et améliorer la signification des observations actuelles en combinant avec l'expérience Nova, avant le démarrage de la prochaine génération d'expériences DUNE/HK.

Les groupes français proposent de participer aux prochaines phases de T2K selon un programme scientifique et technique cohérent et ciblé sur les réductions d'effets systématiques et basé sur l'expertise mise en œuvre dans le projet T2K dès son début avec les détecteurs proches et NA61/Shine. Ce programme de réduction d'effets systématiques, bien que divisé en plusieurs parties propres à chaque laboratoire, est un atout des groupes français et doit être maintenu et soutenu. Cela serait cependant plus favorable de se mettre sur des participations communes pour plus de visibilité et d'efficacité.

Les développements techniques proposés sont adaptés aux expériences des laboratoires impliqués dont les équipes techniques semblent bien dimensionnées. Les améliorations des TPC horizontales, bien qu'ambitieuses, sont relativement bien définies. Par contre une note de prudence est nécessaire sur les implications sur les Super-FGD dont le concept et l'acquisition ne sont pas encore définitifs, notamment la partie concernant l'électronique de lecture que le LLR propose de développer selon un concept en cours de réflexion avec les partenaires de l'Université de Genève.

SuperKamiokande:

L'expérience SK est une expérience remarquable et d'une très grande richesse scientifique qui a obtenu des résultats uniques et du plus haut niveau. Être en mesure de participer et collaborer dans cette expérience est intéressant d'un point de vue scientifique et stratégique. Cela permet d'avoir accès aux données des neutrinos atmosphériques, des études d'explosion de supernovae ainsi que la désintégration du proton. Cela peut être vu comme une opportunité. Le groupe du LLR a rejoint la collaboration avec une participation technique concernant la remise en forme du détecteur avant la nouvelle phase de SK avec gadolinium et une volonté de développer une analyse centrée sur l'étude du fond diffus de supernovae. Un seul groupe français dans cette collaboration risque d'avoir un impact faible à moins de trouver un sujet d'analyse dont le groupe pourrait prendre la tête et ainsi être visible.

Il semble qu'il est risqué de ne pas formaliser davantage l'accord entre l'IN2P3 et SK dans ce contexte.

Il est important que les activités du LLR dans T2K et les améliorations de T2K restent dans tous les cas prioritaires par rapport à SK et HK.

Hyper-Kamiokande

L'expérience HK a des objectifs scientifiques bien établis, de premier ordre, sur le même plan et avec des performances similaires à DUNE, mais avec une technologie différente et un programme différent. La complémentarité des projets est claire et c'est un atout. Le LLR et le LPNHE manifestent un intérêt pour rejoindre HK.

Le projet n'est pas actuellement approuvé au Japon et il n'y a pas suffisamment d'informations quant à l'organisation du projet pour envisager et discuter des participations directes à HK.

Les pistes de contributions techniques proposées par le LLR et le LPNHE concernent les photomultiplicateurs et leur électronique de lecture. Bien que la discussion sur HK soit trop prématurée, le projet de regarder les multi-PMTs comme alternative aux PMTs simples est très intéressant en tant que projet R&D, en particulier par la cohérence avec les développements effectués à l'IN2P3 dans le cadre de KM3Net.

Le conseil suggère de continuer à suivre l'évolution du projet et aux groupes concernés d'être attentifs à la structuration du projet, relativement floue pour un programme qui prévoit de démarrer rapidement.

1.6. Expérience STEREO

Deux laboratoires de l'IN2P3 sont impliqués dans cette expérience, le LAPP et le LPSC avec la contribution de six physiciens permanents pour une collaboration d'une vingtaine de personnes au total. L'IN2P3 est donc très visible dans cette expérience avec des responsabilités importantes. Actuellement, la moitié de la collaboration appartient à l'IN2P3. C'était déjà le cas de 2014 à 2016 lorsque le personnel technique avait une participation importante. Le CEA participe également. Les financements (hors personnels permanents) sont venus majoritairement de l'ANR (85% du financement IN2P3). Des surcoûts liés au besoin d'études sismiques et des risques incendies requises par l'ILL après la mise en place de nouvelles normes par l'ASN suite à la catastrophe de Fukushima ont été demandés à l'institut.

Avis et recommandations

Les membres de l'expérience STEREO, une collaboration d'une vingtaine de personnes, dont une moitié appartient à l'IN2P3, ont su mettre sur pied une expérience neutrinos sur réacteur relativement rapidement pour répondre à la question de savoir si le déficit de flux est un effet de la présence d'un neutrino stérile, un quatrième neutrino qui s'ajouterait aux neutrinos du modèle standard. Malgré une prise de données et surtout une analyse compliquée par des problèmes de non-linéarité du détecteur, ils ont réussi à exclure à 98,8% le point dans le plan (masse, angle) qui donnait le meilleur ajustement pour les neutrinos stériles. La prise de données actuelle, en conditions bien meilleures, permet d'espérer un autre résultat remarquable de cette collaboration car la maîtrise des systématiques sera plus aisée. L'expérience STEREO a l'avantage d'être relativement en avance sur ses concurrentes.

Le conseil félicite la collaboration STEREO pour ses premiers résultats. Il l'encourage à ne pas relâcher son effort d'analyse malgré l'arrêt des deux contrats post-doctoraux actuels, ce qui aura forcément un impact sur les forces vives d'une petite équipe. Le conseil encourage la direction à soutenir les efforts d'analyse en cours.

Il encourage les membres de la collaboration à se rapprocher des experts en matière de simulation pour tout ce qui est calcul de spectres auprès de réacteurs, experts qui se trouvent au laboratoire SUBATECH. Il semble que les contacts ne sont établis qu'avec les membres de SoLiD alors que les deux collaborations pourraient bénéficier de leur expertise. Le conseil encourage également les deux collaborations à penser à la façon de combiner leurs résultats en vue d'une publication commune à terme. Le GdR neutrinos semble le cadre idéal de cette discussion.

Il soutient pleinement la volonté des membres de STEREO de ne pas se consacrer exclusivement à la potentielle découverte de neutrinos stériles, même si le détecteur a été construit dans ce but, mais de prendre également le temps de publier des spectres en énergie des neutrinos. Notamment grâce à la composition du cœur de réacteur pur à 93% en ^{235}U , STEREO pourra établir des spectres de qualité en évitant les difficultés liées à l'évolution de la composition du cœur de réacteur, est particulièrement délicate avec les réacteurs commerciaux. En effet au delà de la RAA, la question de l'excès à 5 MeV dans le spectre en énergie des neutrinos mérite également une réponse que STEREO peut aider à apporter.

Enfin le conseil souhaite souligner l'importance d'une réflexion commune sur l'engagement à venir des personnes actuellement membres d'expériences devant se conclure à court terme. La pertinence de démanteler STEREO lors de la maintenance à venir de l'ILL pourrait être mise en balance avec le déplacement du détecteur auprès d'un autre réacteur, moins bruyant, comme BR2 si l'intérêt scientifique est démontré.

1.7. Expérience SoLiD

La collaboration SoLiD comprend essentiellement des groupes français (le LAL, Le LPC Caen, le LPC-Clermont et SUBATECH), anglais et belges. Les investissements initiaux et la main d'œuvre ont été équitablement répartis entre les trois pays. Le projet bénéficie également du soutien précieux de la part du SCK-CEN sur les aspects financiers, humains et techniques, pour l'exploitation du détecteur sur le site de Mol. Les groupes français ont obtenu une ANR et des ressources propres ; ils ont été fortement impliqués dans la conception, le développement et l'installation du détecteur. Les membres des laboratoires français assument un grand nombre de responsabilités pour les prises et analyses de

données qui sont en cours. Les groupes français bénéficient d'une excellente visibilité dans cette collaboration internationale.

Avis et recommandations

Après une mise en service réussie, le projet est en phase d'exploitation. Le conseil recommande que le projet SoLiD soit soutenu jusqu'à la fin de la prise de données, ce qui représente un soutien financier pour les missions, la maintenance du détecteur et le démontage. Cette expérience devrait conduire à des limites plus contraignantes dans la recherche de neutrinos stériles.

Compte-tenu de son expertise dans la détection de neutrinos et les simulations de cœur de réacteurs, le conseil est d'avis que la collaboration devrait également contribuer aux études des divers aspects de l'anomalie des anti-neutrinos de réacteurs avec les résultats de SoLiD. À cet égard, le conseil apprécie les contacts déjà existants de la collaboration SoLiD avec les groupes français de SUBATECH impliqués dans les aspects de physique nucléaire du RAA.

Le conseil accueille favorablement et recommande de poursuivre les actions visant un transfert de technologie du détecteur pour des applications de valorisation, notamment pour la surveillance des réacteurs dans le cadre de la non-prolifération.

Après la période d'exploitation de SoLiD, les orientations de certains groupes dans le domaine de la physique des neutrinos sont moins claires. Le conseil exprime son inquiétude sur le fait que, au vu notamment des échelles de temps habituelles, une réflexion sur l'avenir des groupes, intégrant l'expertise nouvellement acquise, n'a pas encore toujours abouti. Compte-tenu de l'incertitude actuelle dans le domaine des neutrinos stériles, le conseil recommande d'étudier les perspectives à long terme des groupes dans une optique plus large, le GdR neutrinos pouvant fournir un cadre adapté à cette démarche.

2. Vie du conseil

2.1. Compte-rendu

Le compte-rendu du conseil de février 2018 a été adopté à l'unanimité moins 2 abstentions lors d'un vote électronique en septembre avec 18 votants sur 22 membres.

2.2. Fonctionnement du conseil

Comme évoqué lors du précédent conseil, le CS doit statutairement fournir un rapport de perspectives. Il sera rendu en fin de mandat, donc fin 2018, et sera basé sur les dix thèmes étudiés et évalués au cours du mandat en cours.

Il a été demandé si le conseil allait émettre un avis sur le regroupement des quatre laboratoires de l'IN2P3 de la vallée (CSNSM, IMNC, IPNO et LAL). Le conseil n'a pas les éléments pour avoir un avis pertinent et donc ne se prononce pas. La direction nous informe que ce futur grand laboratoire regroupera environ 500 personnels du CNRS et une centaine de personnels universitaires. Il rassemblera 25% des personnels dont 23% des chercheurs et 27% des ITA de l'IN2P3. Sa construction doit permettre une meilleure attractivité et une présence à l'internationale renforcée.

2.3. Échange avec la direction

L'Institut est envié pour son CSI qui l'aide à prendre des décisions. Parallèlement, le CSI de l'IN2P3 bénéficie de plus de considération et de reconnaissance de la part de la direction que les conseils des autres instituts.

Suite à notre demande d'avoir un retour sur la suite des recommandations formulées lors des conseils de 2016, Reynald Pain, Fanny Farget et Jean-Luc Biarrotte se sont exprimés. Ces conseils scientifiques portaient sur le développement des accélérateurs et la radiochimie.

Généralités :

Ces conseils ont permis de mettre en avant des activités peu connues par le reste de l'Institut. L'un des bénéfices a ainsi été ce travail de communication en interne. Ces conseils ont permis le recensement des activités et des perspectives, sachant que certaines n'avaient pas été examinées depuis nombreuses années. Le rythme de trois conseils par an en regroupant des thématiques aura permis de passer en revue la quasi-totalité des projets depuis 2016.

Les rapports du conseil sont des outils de travail pour la direction. Les missions telles qu'actuellement définies des DAS sont très proches des équipes et des projets. Ainsi, une vision extérieure apporte un éclairage utile et riche.

Ces domaines, celui des accélérateurs notamment, comptent de nombreux ingénieurs qui effectuent un véritable travail de chercheur. La direction a noté que l'IN2P3 compte 570 ingénieurs de recherche, 220 d'entre eux ont un doctorat et 80 à 90 d'entre eux publient et encadrent des doctorants. Il est donc légitime de considérer ces derniers comme des chercheurs. Ainsi, il est possible de recruter dans la thématique des accélérateurs dans le corps des IR.

Accélérateurs : La direction est à la recherche du bon équilibre entre recherche et construction, elle a besoin de savoir quel domaine renforcer, quel développement

éventuellement arrêter. La direction cherche également à structurer les activités et à mettre des priorités sur les projets.

Ainsi des *master-projets* de R&D focalisés et cohérents (tels que la création de deux projets ions-radioactifs et ions-stables destinés à produire des données indispensables pour alimenter la prospective française en physique nucléaire de basse énergie) ont été définis. En parallèle les projets de R&D non prioritaire sont progressivement supprimés. On note également la création d'un réseau d'expertise « Diagnostics et Contrôle faisceau ».

Des équipes de recherche ont été mises en place dans certains laboratoires, mais pas encore dans tous les laboratoires concernés qui comptent des IR publiant et encadrant des étudiants. Le nombre de doctorants et de post-doctorants travaillant sur ces sujets dans les laboratoires est d'ailleurs en augmentation, ce qui est un très bon signe.

La difficulté concerne essentiellement la reprise en main du pilotage et la priorisation des projets, dont la plupart sont hérités de la décennie précédente. En effet on dénombre beaucoup de projets d'envergure en cours, avec environ 20 M€/an en ce moment via des ressources propres ou des crédits TGIR, contre environ 10 M€/an avant 2010. Selon la direction, ce mode de financement est associé à un pilotage des directeurs d'unité bien plus fort que dans les autres disciplines, et au détriment des responsables des projets. Le nombre et l'ampleur de ces projets de constructions engendrent actuellement des difficultés en termes de ressources humaines pour répondre à ces engagements. D'après la direction, il serait souhaitable que ces projets de construction accélérateurs se stabilisent à nouveau autour d'une dizaine de M€/an pour retrouver une situation moins tendue et plus propice au développement des activités de recherche et R&D. Dans la même idée de reprise en main du pilotage des projets, des plateformes de recherche labellisées avec comité de pilotage ont aussi été mises en place, avec présence des DAS dans ces comités, et les premiers retours sont très positifs. Sur tous ces aspects, le grand laboratoire de la vallée d'Orsay est un gros chantier avec un très fort potentiel, le second chantier majeur étant le GANIL avec encore beaucoup de développements importants à venir.

Un point propre à ce domaine est que les activités sur les accélérateurs ne servent pas que la physique de l'IN2P3. Il faut effectivement être vigilant sur les moyens humains afin de conserver des ressources suffisantes pour être performant et visible dans les domaines de l'IN2P3. Il est regrettable que les équipes accélérateur de l'IN2P3 n'aient pas joué un rôle plus important dans l'évolution du LHC vers le LHC haute luminosité, malgré l'impact majeur de ce projet sur la communauté et les compétences disponibles. Pour la construction de l'ESS, la participation française apporte reconnaissance et visibilité à l'internationale pour le CNRS, même si ce n'est pas pour l'IN2P3.

En ce qui concerne l'accélération de plasma par laser, ce domaine est très clairement en manque de structuration nationale. L'Institut essaie de redresser la situation par la mise en place d'un GdR Accélérateur Laser-Plasma piloté par l'IN2P3 conjointement avec l'INP et qui couvre tous les aspects, de la théories aux applications.

Enfin, afin de conserver la compétence en dynamique de faisceau, une embauche d'ingénieur à l'IPNO a été faite mais il reste des progrès à réaliser.

Radiochimie : Ce domaine est peu connu par les autres spécialités qui évoluent au sein de l'IN2P3 alors qu'il concerne 70 permanents et 40 CDD pour 112 ETP. Le conseil dédié à ce domaine a permis de définir le périmètre « radiochimie » et d'identifier ce qui relève de la science et ce qui relève du service.

La recommandation principale était de renforcer la cohésion au sein de l'institut, entre les instituts et entre les organismes. La structure en *master-projets* aide à la fois à avoir une structure nationale et permettre une meilleure visibilité à l'extérieur. Les activités en radiochimie sont souvent soutenues par des réponses aux appels à projets. Les *masters-projets* permettent à l'Institut à garder la main sur ces activités et de proposer une coordination entre les équipes.

Cette année l'Institut a donné un poste de CRN à la section 13 pour une affectation dans un laboratoire de l'IN2P3 à Orsay avec un profil de recherche fondamentale sur la chimie des actinides. Les réflexions ne se sont pas arrêtées au CSI : interactions avec les experts, démarches auprès du CEA, présence de l'Institut aux Journées françaises de la Chimie sont des exemples des actions qui ont suivi le conseil.

Le rapport mentionnait également le problème des installations vieillissantes dans certains laboratoires. Un travail pour la création d'une Infrastructure de recherche qui comprendrait un réseau de laboratoires de chimie chaude inter-instituts et inter-organismes est en cours afin de permettre de palier durablement ce problème. Cette approche semble essentielle étant donnée l'évolution des budgets. Ce sera une façon de porter des projets de science, financés par le CNRS, tout en faisant fonctionner les sites en complémentarité.

La direction mentionne également la création d'un GdR "Sciences nucléaires pour l'énergie et l'environnement". Ce GdR est thématique et non disciplinaire, et permet donc d'associer la radiochimie aux autres activités de l'IN2P3 dans ce domaine. Les recherches en radiochimie menées dans le domaine de la santé apparaissent dans le GDR MI2B. Ainsi, dans ces deux thématiques, l'ensemble des spécialités concernées à l'IN2P3 (physique nucléaire, techniques de détection, radiochimie, ...) s'y retrouvent.

il est animé par la Société Chimie de France et inclut une fusion des divisions radiochimie et chimie sous rayonnement.

Enfin le rapport mentionnait la nécessité d'avoir une action pour coordonner les activités sur les couches minces. Le rapport a noté que la partie préparation des cibles relevait du service pour la physique, mais ne constituait pas a priori une priorité scientifique en radiochimie, même si ces cibles demandent une véritable R&D de pointe.

Ainsi un master-projet, plus modeste et plus ciblé que le projet initial CACAO, a été créé. Les collaborations sont fortement encouragées et commencent à se mettre en place : nous sommes au début du processus. En particulier, le poste de CRN donné à la section 13 a pour objectif, entre autres, de maintenir un niveau de recherche fondamentale dans la chimie des actinides de façon à ne pas limiter cette activité en service pur, qui pourrait détériorer les motivations scientifiques des équipes de radiochimie.

Le conseil demande à la direction un bilan des recommandations émises lors des conseils qui se sont tenus en 2017 pour le conseil d'octobre.

2.4. Futur conseil

Les dates du dernier conseil de l'année sont les 25 et 26 octobre 2018 ; le domaine étudié sera celui de la "physique souterraine", en particulier la recherche de matière noire par détection directe ou les expériences en basse radioactivité. Le détail du programme n'est pas encore établi. Le suivant, qui aura lieu en 2019 avec un conseil renouvelé, devrait concerner les réactions nucléaires.