

Neutrino: masses, oscillations. Désintégration du proton.

Version du 16/02/2012

Participants :

Dario Autiero (IPNL), Marcos Dracos (IPHC), Dominique Duchesneau (LAPP), Muriel Fallot (Subatech), Andrea Giuliani (CSNSM), Laurent Simard (LAL), Alessandra Tonazzo (APC), Arnaud Robert (LPNHE), Michel Gonin (LLR)

Sandrine Emery, Thierry Lasserre, Eduardo Mazzucato, Guillaume Mention, Georges Vasseur, Marco Zito, Claudia Nones (SPP)
Stéphane Lavignac (IPhT)

1 Introduction générale : Physique du neutrino et signaux de Grande Unification

La physique des neutrinos a connu des succès spectaculaires depuis une quinzaine d'années, avec la mise en évidence des oscillations de saveurs à l'aide de sources (neutrinos solaires, atmosphériques, d'accélérateurs) et de techniques de détection indépendantes (détecteurs Cerenkov, scintillateurs liquides...). Les paramètres d'oscillation principaux - deux angles de mélange et deux différences de masses au carré - ont été mesurés avec une bonne précision, et il a été établi que les effets d'éventuelles interactions non standard (NSIs), de neutrinos stériles ou encore de moments magnétiques anormalement grands ne pouvaient jouer qu'un rôle sous-dominant dans les transitions observées entre les différentes saveurs.

Malgré ces succès, de nombreuses questions fondamentales restent encore ouvertes en physique des neutrinos, dont certaines semblent à la portée des expériences actuelles ou de la prochaine génération. Ni l'échelle absolue de la masse des neutrinos, ni le type de hiérarchie de masse ne sont connus; l'angle de mélange θ_{13} n'a pas encore été mesuré, et l'on ne sait pas si la symétrie CP est violée dans le secteur des leptons. L'indication récente, par les expériences T2K, MINOS et Double CHooz, que l'angle θ_{13} pourrait être proche de la limite supérieure de l'intervalle permis permet d'envisager la détermination expérimentale de la hiérarchie de masse et la mise en évidence de la violation de CP dans un futur relativement proche. La nature même des neutrinos, fermions de Dirac ou de Majorana, reste un mystère. L'observation de la double désintégration bêta sans émission de neutrino mettrait en évidence que le nombre leptonique est violé à une échelle potentiellement beaucoup plus élevée que celle accessible aux collisionneurs de particules, et aurait de profondes implications théoriques (possibilité de leptogenèse, lien avec une éventuelle théorie de Grande Unification...). A cela s'ajoutent un certain nombre de faits expérimentaux qui ne peuvent s'expliquer dans le cadre des trois neutrinos actifs du Modèle Standard, comme les résultats controversés des expériences LSND et MiniBooNE ou le déficit des antineutrinos de réacteurs. La confirmation de ces anomalies, ou l'observation d'effets non standard dans les oscillations serait également un signal de physique au-delà du Modèle Standard, qu'il s'agisse de la présence de neutrinos stériles ou d'interactions anormales (NSIs) des neutrinos. Enfin, les expériences d'oscillations permettent de tester des symétries fondamentales comme CPT ou l'invariance de Lorentz, dont la violation pourrait donner lieu à des déviations par rapport aux oscillations usuelles ou à la vitesse de propagation des neutrinos en relativité restreinte.

L'ensemble du programme de recherche expérimental dans lequel les équipes françaises de l'IN2P3 et de l'Irfu sont engagées et jouent un rôle déterminant vise à répondre aux questions fondamentales évoquées ci-dessus comme nous allons l'évoquer dans la suite de ce document. Même si les oscillations de saveurs entre neutrinos ont déjà été fermement établies, il demeure extrêmement important d'améliorer notre connaissance des paramètres d'oscillation (mélanges et différences des carrés des masses) dits solaires (avec notamment la participation dans Borexino), atmosphériques (avec OPERA et T2K) et en particulier de l'angle θ_{13} , dernier bastion avant de pouvoir rechercher la violation de CP dans le secteur leptonique. Les expériences déjà démarrées de T2K et Double Chooz ont pour but d'étudier ce dernier paramètre de mélange de façon complémentaire. Après un panorama de la situation actuelle des paramètres d'oscillations, les efforts fournis par les équipes françaises et les perspectives de ces deux expériences seront évoquées dans la première partie. Nous y aborderons également le sujet redevenu récemment très actif des anomalies (LSND, MiniBooNE, Gallium et réacteurs) recensées dans la recherche des oscillations de neutrinos, leurs enjeux ainsi que les perspectives envisagées pour les résoudre. Les propriétés de hiérarchie de masse et de violation de CP sont au cœur des préoccupations des développements pour les détecteurs de grande taille dans le cadre du programme européen LAGUNA-LBNO que nous aborderons dans la deuxième partie. Ce type de détecteur présente en particulier un potentiel unique pour étudier la possibilité de la désintégration du proton prédite par les théories de Grande Unification. Enfin, les problèmes fondamentaux de la nature de Dirac ou Majorana des neutrinos ainsi que de l'échelle absolue de masse sont eux activement traités par les expériences de double bêta sans neutrino, NEMO3 qui s'achève, et son successeur SuperNEMO suivant l'approche traco-calorimétrique puis avec les expériences basées sur l'utilisation de bolomètres. Les deux techniques principales complémentaires de recherche de candidats double-bêta seront développées dans la dernière partie ainsi que les objectifs atteignables en termes de sensibilité.

2 Physique des oscillations de neutrinos

2.1 États des lieux des paramètres et progrès à venir

Dans l'hypothèse d'un neutrino massif décrit par un spineur de Dirac et de l'existence de 3 neutrinos et en se plaçant dans la base des états propres de masse, 1 unique phase complexe δ (pouvant être source de violation de symétrie CP) et 3 angles en addition des 6 masses de leptons (dont les 3 masses de neutrino m_i) sont potentiellement observables. Ce changement de base conduit typiquement à introduire une matrice unitaire de mélange des saveurs dans le terme des courants chargés, qui exhibe les observables précitées, et qui est désignée comme matrice de Pontecorvo-Maki-Nagawaka-Sakata (PMNS). Pour ce premier paradigme, de manière similaire à la matrice CKM du secteur des quarks, la paramétrisation usuelle "standard" retenue est du type:

$$U_{PMNS}^{(I)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

avec l'intervention des angles de mélange $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$; $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, sachant que la hiérarchie des masses n'est pas encore totalement déterminée par rapport à l'ordonnement retenu. On a donc la forme synthétique:

$$U_{PMNS}^{(I)} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

Dans ce contexte, il convient de noter qu'aucun mélange n'est possible entre saveurs de neutrinos actives et stériles.

La distinction des états propres d'interaction de jauge et de masse conduit, pour un neutrino produit dans un état quantique de saveur bien déterminée, à une évolution temporelle où les phases relatives entre les états propres de masse constituant varient au cours de la propagation libre selon l'ossature de leur mélange, et il en découle alors un possible phénomène d'oscillation de saveur entre deux points d'espace-temps distincts. Pour les expériences présentées dans la suite, en l'absence d'un accès précis aux instants liés à la production et à la détection, la probabilité d'oscillation de saveur $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ mesurée résulte d'une moyenne temporelle incohérente sur les durées de propagation des neutrinos constituant le flux source étudié, exhibant ainsi une seule dépendance spatiale en la distance L séparant les deux points respectifs.

En se plaçant dans un schéma à 3 saveurs, $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ fait ainsi intervenir les produits génériques de termes de la matrice PMNS sous la forme:

$$\mathcal{P}_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L/E) = \sum_{k,j \in [1,3]} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp[-i \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E}]$$

La dépendance en la variable distance parcourue sur énergie L/E est explicite avec les fréquences $\Delta m_{kj}^2 = m_k^2 - m_j^2$. L'échelle de masse absolue est donc ici inaccessible.

Pour les paramètres θ_{kj} et Δm_{kj}^2 , implicites dans les éléments PMNS, il faut considérer a priori des valeurs effectives qui traduisent les effets de propagation/interaction dans la matière (mécanisme de Mikheev-Smirnov-Wolfenstein), ces derniers pouvant singulièrement affecter les valeurs initiales en cas de résonance. Cette assertion est triviale dans le cadre d'effets marqués, elle est une correction dont l'ordre est soumis à la précision expérimentale que l'on peut atteindre dans le cas contraire.

Mesures dans le secteur solaire

Dans l'ordonnancement numérique de la base concernée, les deux premiers états propres de masse des neutrinos sont dits relatifs au secteur "solaire" des paramètres de la matrice PMNS.

En effet, l'écart en masses carrées $m_{2-}^2 - m_{1-}^2 = \Delta m_{21}^2$ en régit la fréquence de l'oscillation dominante pour un rapport distance parcourue sur énergie de l'ordre de 10^5 km/GeV. Les neutrinos électroniques ν_e engendrés dans les mécanismes solaires et les anti-neutrinos électroniques $\bar{\nu}_e$ issus des réacteurs nucléaires en constituent dès-lors un laboratoire de premier choix. L'angle de mélange θ_{12} règle quant à lui la magnitude du taux de disparition de ces neutrinos de saveur électronique. A ce jour, les expériences relatives aux neutrinos solaires que sont Borexino, Gallium, Chlorine, SNO et Super-Kamiokande fournissent la contrainte la plus forte sur l'angle θ_{12} et l'expérience sur réacteur KamLAND a conduit la mesure la plus précise de la fréquence Δm_{21}^2

La combinaison de l'ensemble des données fournit les valeurs suivantes:

$$\Delta m_{21}^2 = 7.59 \pm 0.20 - 0.18 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad \theta_{12} = (34.06 \pm 1.16 - 0.84)^\circ$$

La détermination du signe de Δm_{21}^2 et l'absence d'ambiguïté pour θ_{12} trouvent opportunément leur origine dans les effets de matière dense qui affectent les oscillations dans le coeur solaire au travers de l'effet MSW.

Mesures dans le secteur atmosphérique

La valeur du second écart en masses carrées $m_{23} - m_{21} = \Delta m_{31}^2 \sim \Delta m_{32}^2$, associée au secteur atmosphérique, résulte de l'étude relative aux oscillations de neutrinos muoniques ν_μ présentant un rapport distance parcourue sur énergie de l'ordre de 10^3 km/GeV. Le taux de disparition de ces derniers est gouverné par le facteur $\sin^2 \theta_{23}$. Le terme atmosphérique trouve son origine dans la mise en évidence par l'expérience Super-Kamiokande de la disparition des ν_μ initialement produits dans l'atmosphère terrestre et qui fournit à ce jour la valeur la plus précise relativement à l'angle de mélange avec $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.96$ à 90% de degré de confiance. Ce secteur est désormais aussi intensivement exploré sur accélérateur dans le faisceau étudié à longue distance pour les expériences MINOS et T2K. Par rapport au secteur solaire, la suppression du mécanisme MSW est ici trop marquée pour permettre de lever l'ambiguïté de signe pour Δm_{31}^2 (de même que pour déterminer θ_{23} de manière univoque). Par conséquent, deux hiérarchies, normale et inversée, doivent être considérées pour toute mesure afférente.

A l'heure actuelle, l'ajustement global de l'ensemble des données disponibles conduit aux valeurs suivantes:

$$\Delta m_{31}^2 = +2.50 \pm 0.09 \mp 0.16 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \sin^2(2\theta_{23}) = 0.52 \pm 0.06 \mp 0.07 \text{ pour la hiérarchie normale.}$$

$$\Delta m_{31}^2 = -2.40 \pm 0.08 \mp 0.09 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \sin^2(2\theta_{23}) = 0.52 \pm 0.06 \mp 0.06 \text{ pour la hiérarchie inversée.}$$

L'expérience MINOS, en addition des ν_μ , offre également l'accès à une étude dédiée de leurs anti-particules $\bar{\nu}_\mu$. Le comportement est attendu identique dans le cadre du Modèle Standard Electrofaible, théorie quantique des champs invariante sous la symétrie CPT.

Avec $|\Delta m_{31}^2| = 3.36 \pm 0.46 \mp 0.40 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ et $\sin^2(2\theta_{23}) = 0.86 \pm 0.11 \mp 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.01 \text{ (syst)}$, les premières mesures de 2010 relatives aux neutrinos et anti-neutrinos étaient seulement consistantes à 2% de degré de confiance. Depuis la fin de l'été 2011, la mise à jour des résultats avec une statistique plus élevée tend à gommer cette disparité en fournissant $|\Delta m_{31}^2| = 2.62 \pm 0.31 \mp 0.28 \text{ (stat)} \pm 0.09 \text{ (syst)} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ et $\sin^2(2\theta_{23}) = 0.95 \pm 0.10 \mp 0.11 \text{ (stat)} \pm 0.01 \text{ (syst)}$ et un accord à 42% de degré de confiance.

Le cas de l'angle θ_{13} , vers une violation de CP leptonique ?

Au regard de la matrice MNSP, la mesure de l'angle θ_{13} , procède par deux voies principales: l'exploitation de la disparition d'anti-neutrinos électroniques $\bar{\nu}_e$ à courte distance de leur source en réacteur (expérience CHOOZ) et la caractérisation de la transition $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ dans les expériences sur faisceau à longue distance (expériences T2K et MINOS) mais aussi, plus marginalement, par l'étude des effets sous-dominants dans les expériences relatives aux oscillations atmosphériques. En raison de l'intrication des oscillations avec le paramètre de phase δ et de la présence d'ambiguïtés discrètes, il est indispensable de combiner la plus grande diversité d'informations en provenance de cette multiplicité d'expériences, qui dans ce contexte, s'avèrent bien plus complémentaires que concurrentes.

Après la limite $\sin^2(\theta_{13}) < 0.04$ dominée par les résultats de CHOOZ, l'été 2011 a été riche en résultats puisque T2K et MINOS ont observé chacune un excès pour les événements ν_e attendus sans qu'il soit possible à ce stade de conclure significativement à une valeur non-nulle de θ_{13} , et encore moins sur la valeur de δ qui demeure inconnue.

L'état de l'art actuel pour l'ajustement global présente les valeurs suivantes:

$$\sin^2(\theta_{13}) = 0.013 \pm 0.007 \mp 0.005 \quad \delta/\pi = -0.61 \pm 0.75 \mp 0.65 \text{ pour la hiérarchie normale.}$$

$$\sin^2(\theta_{13}) = 0.016 \pm 0.008 \mp 0.006 \quad \delta/\pi = -0.41 \pm 0.65 \mp 0.70 \text{ pour la hiérarchie inversée.}$$

Le panorama qui se dégage de ces mesures exhibe une matrice U_{PMNS} dépourvue de la structure hiérarchique observée dans la matrice CKM relative aux quarks, mais ne permet pas encore de statuer solidement sur les scénarii de mélange (de type tri-bimaximal dans le cas d'une valeur nulle pour θ_{13}) et encore moins sur des symétries rémanentes des effets au-delà de l'échelle électrofaible.

Sur l'angle de la symétrie CP, il n'y a là encore aucune information émergente pour établir la valeur de l'invariant de Jarlskog $J = s_{12}s_{23}s_{13}c_{12}c_{23}c_{13}^2 \sin \delta$, curseur du degré de violation nécessaire aux scénarii de leptogenèse et/ou de baryogenèse.

2.2 Theta13

Projets réacteurs : l'expérience Double Chooz

L'expérience Double Chooz a pour objectif de mesurer le troisième angle de mélange des neutrinos, nommé θ_{13} . Cette expérience en parallèle avec T2K permettra de mesurer proprement θ_{13} et de définir clairement la feuille de route de la physique des neutrinos dans les vingt prochaines années en ce qui concerne la violation de CP et la hiérarchie de masse. En parallèle, Double Chooz permettra d'évaluer l'intérêt des antineutrinos dans le cadre des missions de non-prolifération de l'AIEA, en lien avec l'expérience Nucifer. D'autres projets sur réacteurs sont en cours de réalisation, Daya Bay en Chine et RENO en Corée. Ces 2 expériences ont également commencé à prendre des données en 2011.

L'expérience Double Chooz comportera deux détecteurs identiques. Le premier d'entre eux, situé à une distance d'environ 1 km des réacteurs, a été construit entre 2008 et 2011. Il est actuellement en prise de données (phase I) depuis le mois d'avril 2011. Sous peu, la comparaison entre le nombre de neutrinos mesurés par le détecteur à 1 km et le flux attendu permettra d'améliorer l'estimation de θ_{13} et apportera un nouveau regard sur les résultats publiés récemment par les expériences T2K et MINOS.

Par la suite un deuxième détecteur sera installé dans un nouveau laboratoire souterrain. Depuis le mois de juin 2011, un second tunnel est en cours d'excavation. Ce nouveau détecteur, situé à 400 m des cœurs, entrera en opération fin 2012 (phase II). À cette distance, les effets de conversion de saveurs dus à une valeur non nulle de θ_{13} restent peu importants. En comparant les résultats des deux détecteurs, une précision accrue sera obtenue sur la mesure de θ_{13} . Les données accumulées lors de la phase I devraient permettre de gagner très rapidement en précision sur la mesure de θ_{13} avec le détecteur proche lors de la 2^{ème} phase.

Au total la durée de prise de données de Double Chooz devrait s'étaler sur 3 à 5 ans en prenant en compte les 2 phases de l'expérience. La sensibilité limite de cette expérience avoisine les 0.03 à 90 % de confiance. Au terme, cette expérience devrait donc pouvoir prouver l'existence des oscillations de neutrinos avec un niveau de confiance statistique avoisinant les 4σ si on en croit les indications globales actuelles qui semblent signaler $\sin^2(2\theta_{13}) \sim 0.08$.

Projets faisceaux

Dans ces études, les projets avec un faisceau de neutrino jouent un rôle crucial car ils permettent d'accéder aux mesures suivantes :

- Angles θ_{23} et θ_{13} de la matrice PMNS
- Différences de masse Δm_{31}^2
- Hiérarchie de masse
- Phase δ de violation de la symétrie CP

A ces mesures, il faut ajouter les mesures de type « temps de vol » des neutrinos qui vient de donner des indications sur une possible vitesse super-luminale des neutrinos (anomalie d'OPERA). Cela ouvre des nouvelles perspectives très excitantes de tests de relativité qui doivent être suivis et soutenus avec la plus grande attention.

En particulier il faut souligner la très grande importance du paramètre θ_{13} qui va déterminer la configuration générale des futures expériences requises pour étudier la phase δ de violation de la

symétrie CP. A cela s'ajoutent des informations précieuses sur la nature des oscillations car les expériences avec un faisceau permettent de vérifier l'apparition d'une nouvelle saveur.

T2K est la première expérience d'oscillation de neutrino sur une grande distance optimisée pour la mesure de l'angle θ_{13} . Elle se compose d'un faisceau très intense de protons (énergie de 30 GeV, intensité nominale de 750 kW, intensité effective 145 kW en mars 2011) basée sur le complexe d'accélérateurs de JPARC (Tokai, Japon), d'un ensemble de détecteurs à 280m de la cible et de SuperKamiokande (SK, masse fiducielle 22.5kt) comme détecteur lointain à 295 km. Il s'agit aussi de la première expérience qui utilise la technique d'un faisceau hors-axe, afin d'obtenir un faisceau très étroit en énergie, optimisé pour avoir un effet maximum d'oscillation à SK. Cela permet aussi de réduire l'intensité des neutrinos de haute énergie, qui engendrent des bruits de fond dans la recherche de l'apparition de ν_e . Le flux des neutrinos est maximum à l'énergie de 600 MeV, c'est-à-dire dans une région où les neutrinos interagissent essentiellement de façon quasi-élastique. Cette réaction est particulièrement bien adaptée à un détecteur Cherenkov.

Le but principal de T2K est l'étude de l'apparition de ν_e dans un faisceau de ν_μ , ce qui signe un angle θ_{13} non nul. T2K pourra aussi fournir une étude de grande précision des paramètres θ_{23} et Δm^2_{31} .

Les bruits de fond principaux pour la mesure d'apparition sont dus aux ν_e présents dans le faisceau dès l'origine et à la réaction NC avec production de π^0 . Ces bruits de fond peuvent être contrôlés avec une bonne précision par des mesures dans le détecteur proche.

Le flux de neutrino est prédit à partir des résultats de l'expérience NA61/SHINE (CERN) qui mesure les sections efficaces de production des pions et des kaons dans l'interaction d'un faisceau de proton sur une cible de carbone. Le flux prédit est vérifié par la mesure des interactions dans le détecteur proche.

T2K a démarré sa prise de données en décembre 2009 et a enregistré en 2010 et 2011 un échantillon correspondant à $1.43 \cdot 10^{20}$ pot. Cela correspond à plusieurs milliers d'interactions de neutrino en position proche et à une centaine à SK. L'expérience a publié en juillet 2011 ses premiers résultats. A la fin de la procédure de sélection, six événements avec un anneau de type électron sont isolés dans les données de SK alors que le bruit de fond attendu est de 1.5 ± 0.3 événements. La probabilité d'une fluctuation statistique si θ_{13} était zéro est de 0.7 %. On obtient pour la première fois une mesure avec une région de confiance à 90 % qui exclue une valeur nulle de θ_{13} .

L'expérience T2K a aussi montré les résultats de l'analyse de disparition des ν_μ qui confirment leur disparition quasi totale dans la région attendue et qui donnent une première mesure des paramètres d'oscillation compatible avec les expériences SK et MINOS.

La prise de données de T2K va reprendre au début de 2012 dans le but d'accumuler 10^{21} pot à l'été 2013. Cela permettrait une mesure à 5 sigma pour $\sin^2(2\theta_{13})=0.11$.

2.3 Anomalies

Un certain nombre d'anomalies ont été accumulées dans les recherches d'oscillations de neutrino dans la comparaison des spectres et/ou taux attendus et mesurés sans qu'aucune de ces expériences n'ait pu ni affirmer une découverte, ni infirmer les indications. Parmi ces anomalies, nous recensons la première qui soit apparue, LSND, mesurant un excès d'anti-neutrinos électroniques dans un faisceau d'anti-neutrinos muoniques. L'expérience MiniBooNE n'est pas en mesure aujourd'hui avec les prises de données neutrinos et anti-neutrinos de trancher sur la question. A contrario les expériences de disparition sur faisceaux, telles que KARMEN, NOMAD, CDHSW et MINOS n'ont vu aucun effet compatible avec LSND et en viennent à exclure une large portion des paramètres autorisés par LSND est MiniBooNE en mode anti-neutrinos.

Indépendamment, des anomalies de déficit par rapport aux flux attendus lors des étalonnages ont été observées dans les deux expériences de mesures de neutrinos solaires avec des détecteurs à

base de Gallium : GALLEX et SAGE. Ces déficits ont été observés sur les prises de données d'étalonnage des détecteurs avec des sources intenses MCI telles que le ^{51}Cr ou encore l' ^{37}Ar qui émettent des neutrinos électroniques en dessous du MeV. Des doutes subsistent sur la section efficace des interactions de neutrinos électroniques sur Ga, et particulièrement sur la contribution des états excités. Si cette contribution était négligée, il ne resterait qu'un déficit de moins de 10 % par rapport au flux attendu avec une signification statistique alors en dessous de 2σ , tout à fait compatible alors avec l'absence d'anomalie. Néanmoins, le groupe de H. Ejiri, au Japon, RCNP, a mesuré récemment une contribution des états excités à la section efficace totale $\nu + \text{Ga} \rightarrow e + \text{Ge}$ de $6.9\% \pm 1.8\%$ qui renforcerait même donc cette anomalie de GALLEX et SAGE. Ce sujet est donc encore au centre des préoccupations.

Enfin, récemment une nouvelle approche de conversion des spectres β de l' U^{235} , U^{238} , Pu^{239} et Pu^{241} mesurés à l'ILL indique que le flux attendu d'antineutrons auprès des réacteurs était jusqu'à présent sous-estimé de 3.5%. À cela se rajoute deux autres effets non pris en compte lors des analyses des expériences neutrinos auprès de réacteur : les flux de neutrinos provenant des isotopes à vie longue, non mesurés à l'ILL, n'étaient pas pris en compte, et le temps de vie du neutron était surestimé par rapport aux dernières mesures de Cerebrov et al., et de Mambo II. Ces trois ingrédients amènent à un déficit entre les taux attendus et mesurés de $5.7\% \pm 2.3\%$. Si ce déficit est interprété en termes d'oscillation, les mesures effectuées par Bugey-3 contraignent le Δm^2 associé à être au-dessus de 1eV^2 également. En outre, l'expérience de mesure du flux de neutrinos à l'ILL, montre une compatibilité avec une interprétation d'oscillation sur le spectre en énergie avec un Δm^2 aux environs de 1eV^2 , même si la conclusion originale du papier se contente d'exclure les plus grands angles de mélange, en raison d'une limitation statistique pour interpréter ce signal de façon positive.

Cette accumulation d'indications interprétables en termes d'oscillations mène individuellement vers des échelles de Δm^2 de l'ordre de 1eV^2 . Ces indices semblent mettre en évidence donc un Δm^2 non compatible avec les 2 autres mesurés. L'extension la plus simple pour la phénoménologie serait de supposer l'existence d'un ou plusieurs neutrinos dits stériles (qui ne participent pas à l'interaction faible) mais qui participent cependant aux oscillations par leurs masses et leurs mélanges avec les neutrinos actifs. Mais cette hypothèse ne fonctionne qu'individuellement seulement (ou tout au plus par secteur : expérience d'apparition sur faisceaux d'un côté, et expérience de disparition sur réacteur et sources radioactives intenses pour les détecteur à base de Gallium) ! La combinaison globale de ces anomalies reste difficile à interpréter à l'aide de neutrinos stériles.

Des scénarios simples à 1 ou 2 neutrinos stériles ne semblent pas suffisants pour rendre compte des différentes "anomalies" constatées. Cette confusion générale ouvre des perspectives nouvelles sur des modes d'interaction non standard et sur des projets d'expérience pour lever le doute sur ces anomalies.

Parmi les projets en phase d'installation figurent ceux des équipes travaillant sur l'étude de la non-prolifération nucléaire avec les neutrinos, comme Nucifer (France, CEA et Subatech), DANSS (Russie) ou encore le proposal SCRAAM (USA). Ces projets pourraient apporter des informations sur l'anomalie réacteur très prochainement, mais avec une signification statistique toutefois limitée. Ils pourraient néanmoins permettre d'indiquer plus clairement si cette anomalie subsiste. D'autres projets sont donc ainsi à l'étude, recourant à l'utilisation de sources radioactives intenses (PBq) comme le ^{51}Cr (source de neutrinos au-dessous du MeV) ou le ^{144}Ce (source d'anti-neutrinos au-dessus du seuil de la réaction de désintégration β inverse sur proton libre). L'une de ces sources placée dans un grand détecteur comme Borexino, SNO ou KamLAND permettrait non seulement une mesure des taux de neutrinos à différentes distances avec une source de ^{51}Cr de quelques MCI dans le détecteur, mais aussi conjointement en énergie avec une source de 50 kCi de ^{144}Ce . En outre, ce dernier type de source produisant des anti-neutrinos donne le moyen de réduire drastiquement les bruits de fond grâce à la coïncidence utilisable dans la détection par réaction β inverse. D'autre part

d'autres projets réacteur pourraient voir le jour dans la prochaine décennie notamment auprès du réacteur de recherche de l'ILL à Grenoble. Des perspectives sur ce thème vont bientôt être engagées. Ce réacteur de recherche présente de par sa compacité et sa pureté en U235 de grands atouts pour sonder l'anomalie réacteur dans des conditions exceptionnelles. Rappelons que l'expérience de mesure de neutrinos réacteur effectuée à l'ILL en 1981 est l'une des seules à avoir observé un signal d'oscillation sur le spectre en énergie grâce à une proximité record de moins de 9 m du cœur du réacteur. Des études de tels projets pourraient donc présenter des perspectives très intéressantes compte-tenu des incertitudes actuelles et de l'intérêt du sujet soulevé dans la communauté mondiale des neutrinos.

Enfin, notons qu'il existe également des projets tels que CERN-LAr (proposé par C. Rubbia et al.) pour étudier à la fois les anomalies de LSND et MiniBooNE, et l'anomalie Réacteur-Gallium avec une même expérience et 2 détecteurs sur un même faisceau au CERN.

3 Physique des détecteurs de grande taille

Dans cette section, nous examinerons le futur plus lointain, à l'horizon 2020. Les expériences envisagées sont basées sur des détecteurs souterrains de grande taille, typiquement la centaine de mètres, ce qui correspond à une masse allant de plusieurs dizaines de kilotonnes à la mégatonne selon la technologie retenue. Ces détecteurs ont le potentiel pour investiguer les propriétés des neutrinos, principalement la hiérarchie de masse et la violation de CP, mais aussi la désintégration du proton et les neutrinos provenant de sources astrophysiques.

3.1 Les détecteurs considérés

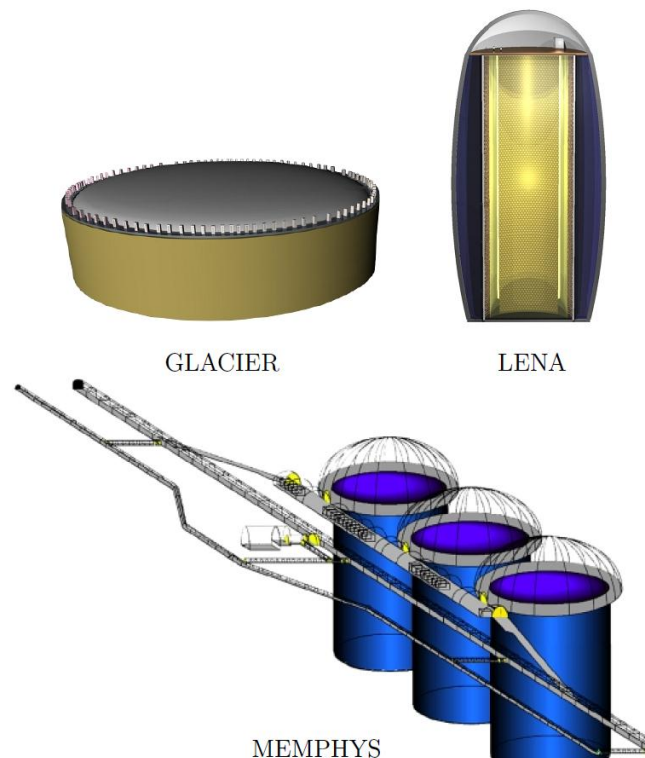


Figure 1 : Vue schématique des grands détecteurs souterrains considérés.

Trois types de détecteurs, illustrés sur la figure 1, sont envisagés : Cherenkov à eau (WC), à argon liquide (LAr) et à scintillateur liquide (LS). En Europe, les détecteurs étudiés ont pour nom MEMPHYS (440 kt WC), GLACIER (100 kt LAr) et LENA (50 kt LS). Le programme européen LAGUNA (2008-2011) a étudié en détail sept sites possibles pour les installer et le nouveau programme LAGUNA-LBNO (2011-2014), qui lui fait suite, se concentre sur les deux sites qui ont émergés, le Laboratoire souterrain de Modane au tunnel du Fréjus et la mine de Pyhäsalmi en Finlande. En parallèle, le programme EURONU (2008-2012) étudie les faisceaux de neutrinos à partir du CERN: des super faisceaux de 2 MW pourraient être disponibles à moyen terme dès 2020, et à plus long terme des faisceaux β et usines à neutrinos. Des projets similaires existent aux Etats-Unis (projet LBNE avec détecteur WC ou LAr et un faisceau envoyé de Fermilab) et au Japon (Hyper-Kamiokande, détecteur WC à Kamioka, ou un détecteur LAr dans l'île d'Okinoshima ou encore un ensemble de deux détecteurs WC à Kamioka et en Corée, avec dans tous les cas un faisceau venant de J-PARC).

Vu l'importance de cette perspective de physique, qui se base sur un paradigme théorique fortement démontré par les expériences, il est nécessaire de suivre ces développements avec une grande attention et surtout d'y jouer un rôle moteur par la participation française dans les expériences de la génération actuelle et dans la proto-collaboration européenne LAGUNA-LBNO.

3.2 Hiérarchie de masse et violation de CP

L'angle θ_{13} devrait être mesuré précisément dans un avenir proche par les expériences de la génération actuelle. Mais la violation de CP dans le secteur leptonique et la hiérarchie de masse des neutrinos resteront probablement indéterminées. Ce sera donc le rôle des grands détecteurs souterrains de la génération suivante de mesurer la phase δ et déterminer la hiérarchie de masse. Si la valeur de θ_{13} reste dans le domaine indiqué par le résultat récent de T2K, c'est-à-dire relativement grande, ces objectifs pourront être atteints dès l'étape de moyen terme basée sur un super faisceau, dont la technologie et les coûts sont maîtrisés. Si jamais θ_{13} avait une valeur plus faible ne pouvant être mesurée par les expériences actuelles, un grand détecteur souterrain pourrait étendre le domaine de recherche d'un ordre de grandeur vers les valeurs plus basses jusqu'à $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0,001$.

Il conviendra de séparer les effets de violation de CP et ceux liés à la hiérarchie de masse, qui sont imbriqués. Ainsi l'option CERN-Fréjus avec une courte ligne de base de 130 km et donc des effets de matière négligeables fournira une mesure très propre de la violation de CP, obtenue par comparaison des résultats avec faisceaux de neutrinos et d'antineutrinos. Au contraire, l'option CERN-Pyhäsalmi avec des effets de matière importants sur une longue ligne de base de 2300 km proche de la valeur « magique » donnant une grande sensibilité à la hiérarchie de masse, pourra mesurer simultanément la hiérarchie de masse et la violation de CP, comme l'illustre la figure 2. Ces deux longueurs de ligne de base, non considérées ailleurs, offrent donc à l'Europe d'excellentes opportunités. En outre, pour un avenir encore plus lointain, elles sont bien adaptées pour un faisceau β dans le cas du Fréjus et pour une usine à neutrinos dans le cas de Pyhäsalmi.

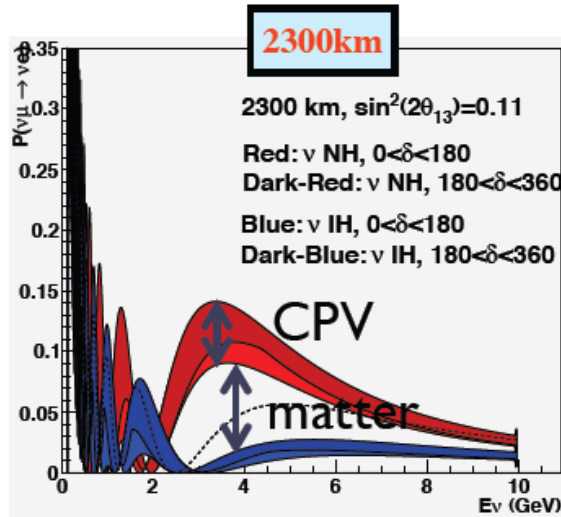


Figure 2 : Probabilité d'apparition de ν_e en fonction de l'énergie du neutrino dans l'option CERN-Pyhäsalmi, où les effets de matière et de violation de CP sont clairement séparés.

3.3 Désintégration du proton

La désintégration du proton est l'une des rares prédictions des Théories de Grande Unification (GUT) à pouvoir être testée expérimentalement. Sa découverte serait une preuve éclatante de l'existence d'une physique au-delà du Modèle Standard.

Les première (IMB, Fréjus, Kamiokande) et seconde génération (Super-Kamiokande) d'expériences de désintégration du proton ont posé de fortes limites sur la durée de vie du proton, excluant en pratique le modèle SU(5) minimal (première génération) et le modèle SU(5) supersymétrique minimal (seconde génération). Les meilleures limites actuelles sont dues à l'expérience Super-Kamiokande, soit pour les modes de désintégration les plus pertinents d'un point de vue théorique : $\tau(p \rightarrow \pi^0 e^+) > 8,2 \cdot 10^{33}$ yrs (90% C.L.) et $\tau(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) > 2,3 \cdot 10^{33}$ yrs (90% C.L.). Un détecteur souterrain de grande taille permettrait d'améliorer la sensibilité à la désintégration du proton de plus d'un ordre de grandeur, et donc de tester les modèles SU(5) non minimaux, supersymétriques ou non, les modèles fondés sur d'autres groupes de jauge comme SO(10) ainsi que les GUT faisant appel à des dimensions supplémentaires d'espace-temps.

Si les prédictions pour la durée de vie du proton peuvent varier de manière importante d'un modèle à l'autre, certaines caractéristiques générales émergent. Les modes de désintégration les moins dépendants du modèle sont ceux induits par l'échange de bosons de jauge unifiés superlourds. Parmi ces modes de désintégration, $p \rightarrow \pi^0 e^+$ est dominant, avec une durée de vie partielle typique $\tau(p \rightarrow \pi^0 e^+) \approx 10^{35}$ années $(M_X / 10^{16} \text{ GeV}) ((1/24) / \alpha_{\text{GUT}})^2$, où M_X est la masse des bosons de jauge unifiés, $\alpha_{\text{GUT}} \equiv g_{\text{GUT}}/4\pi$ et g_{GUT} est la valeur du couplage de jauge à l'échelle de grande unification. Le mode de désintégration généralement dominant dans les GUT supersymétriques, $p \rightarrow K^+ \bar{\nu}$, est beaucoup plus dépendant du modèle. La durée de vie partielle correspondante dépend en effet des couplages et masses des higgsinos triplets de couleur, ainsi que du spectre des partenaires supersymétriques. De nombreux modèles prédisent $\tau(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) \leq 10^{34}$ yrs pour des masses de superpartenaires inférieures au TeV, mais les prédictions s'échelonnent plus généralement entre 10^{29} (pour le modèle SU(5) supersymétrique minimal, désormais exclu) et 10^{36} années.

De nombreux autres canaux de désintégration seront accessibles dans un grand détecteur souterrain ; leur mesure, combinée avec les contraintes du LHC sur le spectre des partenaires supersymétriques (découverte ou limites d'exclusion) permettrait de distinguer entre différents modèles de Grande Unification.

Un détecteur Cherenkov à eau est plus adapté pour le mode $p \rightarrow e^+ \pi^0$, MEMPHYS pouvant obtenir en dix ans une sensibilité de $1,2 \cdot 10^{35}$ années, contre $0,5 \cdot 10^{35}$ années pour GLACIER. Tandis qu'un détecteur à argon liquide, qui reconstruit bien les traces de kaons et n'est pas limité par un seuil Cherenkov, est mieux armé pour le mode $p \rightarrow K^+ \bar{\nu}$. En effet, GLACIER peut atteindre en dix ans une sensibilité de $1,1 \cdot 10^{35}$ années, contre $0,4 \cdot 10^{35}$ années pour LENA et $0,15 \cdot 10^{35}$ années pour MEMPHYS.

3.4 Les neutrinos de sources astrophysiques

Un détecteur « mégatonne » est un observatoire idéal pour l'étude des neutrinos astrophysiques provenant des SuperNovae (SN), du Soleil, de l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère, ou d'autres sources cosmologiques.

Lors de l'implosion du cœur d'une SN, 99% de l'énergie est émise sous forme de neutrinos des trois saveurs, avec des énergies jusqu'à 20 MeV, dans un laps de temps d'une dizaine de secondes. Dans LENA et MEMPHYS, le mode principal de détection est la réaction beta-inversée, sensible aux ν_e . LENA et GLACIER peuvent également détecter les ν_e par les interactions sur ^{12}C et ^{40}Ar respectivement, ce dernier avec un très bas seuil en énergie. La détection des neutrinos des autres saveurs par interaction de courant neutre est également possible. Grâce à la grande taille des détecteurs, le nombre d'interaction de ces neutrinos (entre 10^3 et 10^5 pour une SN à 10 kpc) serait plus élevé que dans les détecteurs existants. En plus, la mesure du temps et de l'énergie des neutrinos donnerait accès à des analyses spectrales, ce qui permettrait de vérifier les modèles d'implosion et/ou d'accéder aux paramètres d'oscillation des neutrinos.

La détection des ν_e émis pendant les premières millisecondes pourrait nous renseigner sur l'existence du « neutronization burst » prévu par certains modèles. La modulation temporelle du spectre porte des informations sur le choc dans la région du profil de l'étoile où la densité est importante pour les oscillations de la matière, et donc sur notre compréhension des modèles de propagation. Des effets non-linéaires dus aux auto-interactions des neutrinos seraient également visibles. Pour terminer, la modulation en énergie des spectres des ν_e et anti- ν_e nous renseigne sur les effets de matière terrestre et permet de distinguer la hiérarchie de masse directe ou inverse, si θ_{13} est suffisamment grand.

Le flux de neutrinos provenant des explosions de toutes SN passées, dit « Diffuse SN Neutrino Background » (DSNB), est une mesure intéressante, car il donnerait accès à une physique différente de celle de l'explosion d'une SN, comme par exemple le taux de formation des SN, lié à celui de formation des étoiles, ou certains scénarios de désintégration des neutrinos. Les DSNB n'ont pas encore été détectés, seule une limite supérieure sur leur flux a été déterminée expérimentalement. Il existe une région d'énergie (10-40 MeV) où le signal peut émerger du bruit de fond, dû aux neutrinos de réacteur ou atmosphériques. Les trois types de détecteur pourraient obtenir l'évidence des DSNB et en mesurer le flux en quelques années de prise de données. La sensibilité de MEMPHYS serait améliorée par du Gd rajouté à l'eau. En plus, la spectroscopie dans LENA pourrait contraindre certains paramètres de l'explosion des SN.

Notre connaissance des modèles solaires et des paramètres d'oscillation MSW-LMA pourra être améliorée par leur détection avec haute statistique dans un détecteur « mégatonne ». En plus de la confirmation précise des mesures déjà effectuée par les expériences passées,

MEMPHYS pourrait obtenir la première évidence des rares neutrinos de la réaction hep ; LENA pourrait être sensible aux variations temporelles du flux de neutrinos du ${}^7\text{Be}$, qui nous renseigne sur l'hélioséismologie, mesurer précisément le flux de neutrinos de très faible énergie de la réaction pep , lié à la luminosité du soleil, et détecter les neutrinos du cycle CNO, qui nous renseigne sur la métallicité du soleil; GLACIER aurait accès à une quantité analogue au rapport CC/NC.

En ce qui concerne les neutrinos atmosphériques, leur détection avec haute statistique fournirait un complément important aux informations des accélérateurs pour la mesure des oscillations.

4 La nature et la masse du neutrino via la désintégration double bêta

La désintégration double bêta ($0\nu 2\beta$) est une éventuelle désintégration nucléaire très rare dans laquelle un noyau métastable se transforme en un noyau plus léger avec l'émission de deux électrons et de rien d'autre. L'observation de ce processus, qui peut en principe avoir lieu pour près de 30 noyaux pairs-pairs, impliquerait la violation du nombre leptonique global et l'existence d'une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard, dans laquelle les neutrinos sont identiques à leur antiparticules, c'est-à-dire des fermions de Majorana. Les théories de champ effectif et les modèles de grande unification supposent que le neutrino, contrairement aux autres fermions du Modèle Standard, est une particule massive et identique à son antiparticule. L'existence de la masse des neutrinos a été prouvée par les expériences d'oscillation de neutrinos, tandis que leur caractère de Majorana ne peut être mis en évidence que par l'observation de la $0\nu 2\beta$.

La génération de cette transition par l'échange d'un neutrino de Majorana léger qui interagit par courant électrofaible gauche est d'une importance particulière. Dans ce cas, le taux de désintégration est proportionnel au carré de la masse effective du neutrino de Majorana, notée $m_{\beta\beta}$, qui peut ainsi être déterminée ou au minimum contrainte à l'intérieur des incertitudes sur les éléments de matrice nucléaire. Ce paramètre est lié à l'échelle de masse absolue des neutrinos et dépend des 3 masses de neutrinos m_1 , m_2 and m_3 . Trois schémas de masse sont distingués : la hiérarchie normale (NH) où $m_1 < m_2 < m_3$, la hiérarchie inverse (IH), où $m_3 < m_1 < m_2$, et le schéma non dégénéré (QD), pour lequel les différences entre les masses sont faibles devant leurs valeurs absolues. Actuellement ce schéma de masse reste inconnu, mais la $0\nu 2\beta$ permettrait l'accès à cette information essentielle, compte tenu de la relation entre $m_{\beta\beta}$ et les trois masses des neutrinos. En fait, la mesure de $m_{\beta\beta}$ avec une valeur supérieure à ~ 50 meV mettrait en évidence le schéma QD et un domaine de valeurs autorisées pour la masse minimale serait obtenu. D'un autre côté, si $m_{\beta\beta}$ est comprise dans l'intervalle $\sim 20-50$ meV, le schéma est vraisemblablement IH. Finalement, si $m_{\beta\beta}$ est inférieure à 10 meV mais non nulle (observation peu réaliste dans un futur proche), le schéma serait NH.

En plus de l'échange d'un neutrino léger, d'autres mécanismes sont possibles, tels que, entre autres, l'interaction de courant droit (V+A) électrofaible, transportée par le boson W_R ; l'émission d'un boson de Goldstone sans masse, le Majoron; des modèles supersymétriques avec violation de la R-parité; l'échange d'un boson de Higgs doublement chargé.

La signature de la $0\nu 2\beta$ consiste, dans le spectre de la somme des énergies des électrons, en un pic situé à la valeur de la transition $Q_{\beta\beta}$. Un critère important dans le choix de l'isotope est la valeur élevée de $Q_{\beta\beta}$, ce qui sélectionne 9 des ~ 30 isotopes $\beta\beta$: leurs propriétés sont résumées dans la table ci-dessous.

Isotope	I.A. (%)	$Q_{\beta\beta}$ (keV)	$G^{0\nu}$ (y^{-1})	Expériences [en (...) projets de R&D]	Techniques
^{48}Ca	0.1 9	4271	$1.4 \cdot 10^{-27}$	(SuperNEMO), (CANDLES)	Tracko-calor, Scintillateurs
^{76}Ge	7.4	2039	$2.4 \cdot 10^{-26}$	GERDA	Diodes Ge
^{82}Se	8.7	2995	$1.1 \cdot 10^{-25}$	SuperNEMO,(LUCIFER)	Tracko-calor, Bolom.Scint.
^{96}Zr	2.8	3350	$2.2 \cdot 10^{-25}$		
^{100}Mo	9.6	3034	$1.7 \cdot 10^{-25}$		Bolomètres scintillants
^{116}Cd	7.5	2802	$1.9 \cdot 10^{-25}$	(COBRA)	Diodes CdZnTe, Bolom. Scint.
^{130}Te	33. 8	2527	$1.7 \cdot 10^{-25}$	CUORE	Bolomètres
^{136}Xe	8.9	2480	$1.8 \cdot 10^{-25}$	EXO, (NEXT), KamLAND-ZEN	TPC, Liquid scintillator
^{150}Nd	5.6	3367	$8.0 \cdot 10^{-25}$	(SuperNEMO), SNO+	Tracko-calor, Liquid scintillator

Une raison pour cette sélection est la dépendance forte de l'espace de phase $G^{0\nu}$ et donc de la probabilité du processus suivant $Q_{\beta\beta}$ ($G^{0\nu} \propto Q_{\beta\beta}^5$). Une autre raison est le bruit de fond issu de la radioactivité naturelle, principalement situé en-deçà de la raie à 2,6 MeV du ^{208}Tl (un noyau fils de la chaîne du ^{232}Th). Les autres considérations mettent en jeu l'abondance isotopique naturelle (I.A.), la faisabilité de l'enrichissement et de la purification, la demi-vie du processus $2\nu\beta\beta$.

La sensibilité actuelle sur $m_{\beta\beta}$ est environ 0,2-0,5 eV. Une revendication de découverte pour le ^{76}Ge avec $m_{\beta\beta} \sim 0.3$ eV est actuellement très fortement controversée. Les expériences en train d'être mise en service ou en construction (GERDA-I, EXO-200, CUORE, SuperNEMO, KamLAND-ZEN, SNO+) peuvent difficilement explorer le domaine IH, avec des sensibilités voisines de 0.1-0.05 eV. L'atteinte de meilleures sensibilités nécessite soit l'extension ou l'amélioration de ces expériences, soit le développement de nouvelles technologies.

Deux approches existent pour la détection des deux électrons émis : l'approche tracko-calorimétrique dans laquelle la source et le détecteur sont distincts et la technique purement calorimétrique, pour laquelle la source est contenue dans le détecteur. Les deux approches sont complémentaires : la première permet une excellente réjection du bruit de fond grâce à l'identification de particules et peut être appliquée en principe à tous les isotopes; la dernière est caractérisée par une meilleure résolution en énergie et une efficacité voisine de 100%.

L'approche tracko-calorimétrique

Dans cette approche, les trajectoires des électrons émis par la source $\beta\beta$ sont reconstruites par un détecteur de traces et leur énergie est mesurée par un calorimètre. Le champ magnétique permet la mesure de la charge des particules et la mesure de temps de vol améliore la reconstruction des événements. La capacité élevée d'identification des particules permet d'atteindre un niveau de bruit de fond extrêmement faible par rapport à d'autres techniques. En outre, chaque composant du bruit de fond peut être mesuré dans un canal dédié de haute statistique, ce qui permet une

compréhension profonde de la nature et du lieu des contaminations radioactives. Du fait de la résolution en énergie limitée (typiquement 2% en σ à 3 MeV), le processus $\beta\beta$ avec l'émission de 2 neutrinos constitue une source de bruit de fond pour la $0\nu2\beta$. Les sources $\beta\beta$ doivent être minces pour réduire l'auto-absorption.

Contrairement aux expériences calorimétriques, la mesure de toutes les informations cinématiques (distribution angulaire, énergie individuelle de l'électron) permet la compréhension du mécanisme à l'origine de la $0\nu\beta\beta$. Cette technique a été adoptée par l'expérience NEMO-3, menée par une collaboration internationale (France, Royaume-Uni, USA, Japon, Tchéquie), qui a pris des données entre 2003 et janvier 2011 au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM), caractérisé par une profondeur de 4800 mètres équivalent eau. L'exposition totale est respectivement 35 kg.an et 4,5 kg.an pour le ^{100}Mo et le ^{82}Se . Ce détecteur cylindrique est divisé en 20 secteurs contenant des feuilles minces (de 50 mg/cm² d'épaisseur) au milieu du volume d'un détecteur de traces entouré par un calorimètre.

Les feuilles sources sont composées de 6,9 kg de ^{100}Mo , 1 kg de ^{82}Se et de quantités plus faibles de ^{116}Cd , ^{150}Nd , ^{96}Zr , ^{48}Ca and ^{130}Te de même que le Tellure naturel ultrapur. Une chambre à fils 3D formée de 6180 cellules à dérive en mode Geiger placée dans un champ magnétique de 25 Gauss assure une mesure du point d'émission avec une précision de quelques mm. Le calorimètre est composé de 1940 blocs de scintillateur plastique couplés à des PMs basse radioactivité : chaque bloc+PM a une résolution en énergie de 3,4 à 4,2 % (σ) et une résolution en temps de 140 ps à 3 MeV. Le détecteur peut identifier e^- , e^+ , γ , α et permet une bonne discrimination entre les événements de signal et de bruit de fond. Il est couvert de deux couches de blindage passif contre les gammas externes et les neutrons. Les demi-vies mesurées du processus $2\nu\beta\beta$ pour les 7 isotopes sont parmi les mesures actuelles les plus précises. Pour la $0\nu2\beta$ deux limites ont été obtenues : $T_{1/2}$ (limite à 90% de niveau de confiance)= $1,0 \times 10^{24}$ an pour le ^{100}Mo and $T_{1/2}$ (limite à 90% de niveau de confiance)= 3.2×10^{24} an pour le ^{82}Se (table 1).

Isotope	Nombre d'évts $2\beta2\nu$	S/B pour $2\beta2\nu$	$T_{1/2}(2\nu)$ [an]	Limite à 90% de niveau de confiance pour $T_{1/2}(0\nu)$ [an]	Limite à 90% de niveau de confiance pour $m_{\beta\beta}$
^{100}Mo	219000	76	$(7.17 \pm 0.01 \pm 0.54) 10^{18}$	$1.0 10^{24}$	0.32-0.96 eV
^{82}Se	2750	4	$(9.6 \pm 0.1 \pm 1.0) 10^{20}$	$3.2 10^{23}$	0.94-2.5 eV
^{116}Cd	1371	7.5	$(2.88 \pm 0.04 \pm 0.16) 10^{19}$	$1.6 10^{22}$	
^{96}Zr	428	1	$(2.35 \pm 0.14 \pm 0.16) 10^{19}$	$9.2 10^{21}$	
^{150}Nd	2018	2.8	$(9.11 \pm 0.25 \pm 0.22 \pm 0.63) 10^{18}$	$1.8 10^{22}$	
^{48}Ca	116	6.8	$(4.4 \pm 0.5 \pm 0.4 \pm 0.4) 10^{19}$	$1.3 10^{22}$	
^{130}Te	236	0.35	$(7.0 \pm 1.0 \pm 0.8 \pm 0.9 \pm 1.0) 10^{20}$	$1.0 10^{23}$	

Table 1 : Résultats de NEMO-3 pour $T_{1/2}(2\nu)$ and $T_{1/2}(0\nu)$.

Une amélioration par rapport à cette expérience sera le projet SuperNEMO, dont le but est d'atteindre une sensibilité sur le neutrino de Majorana de l'ordre de 0,05 eV en 2016-2017. La conception de SuperNEMO (collaboration internationale : France, Royaume-Uni, USA, Japon, Espagne, Slovaquie, Tchéquie) est basée sur la reprise et l'amélioration des techniques utilisées pour NEMO-3 (figure 1 et table 2).

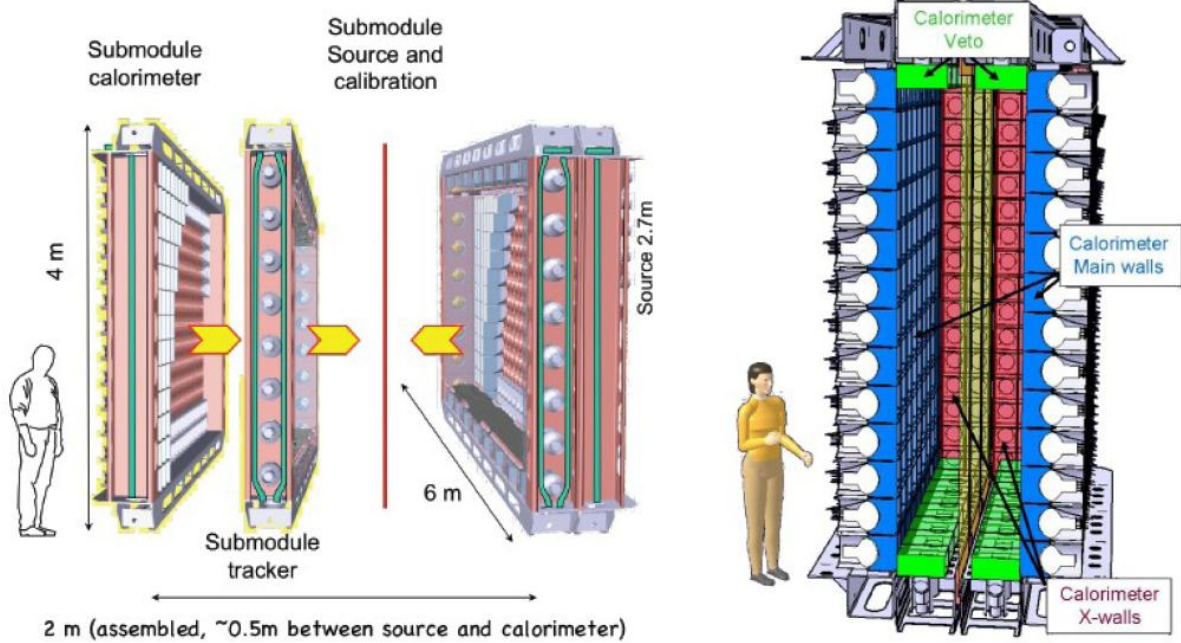


Figure 1 : vue schématique d'un module du détecteur SuperNEMO.

Paramètre	NEMO-3	SuperNEMO
Isotope	^{100}Mo	^{82}Se or other
Masse (kg)	7	100
Efficacité $0\nu\beta\beta$ (%)	~18	~30
Résolution en énergie pour des e^- de 3 MeV (calorimètre), σ (%)	~3,7	~2
^{208}Tl dans les feuilles ($\mu\text{Bq/kg}$)	~ 100	< 2
^{214}Bi dans les feuilles ($\mu\text{Bq/kg}$)	~ 300	< 10
^{222}Rn dans le gaz (mBq/m^3)	~ 5	< 0.2
Limite à 90% de niveau de confiance sur $T_{1/2}$ (0ν) (y)	10^{24}	10^{26}
Limite à 90% de niveau de confiance sur $m_{\beta\beta}$ (eV)	0.32-0.96	0.04-0.11

Table 2 : Comparaison des paramètres de NEMO-3 et de SuperNEMO.

La spécification de la résolution en énergie du calorimètre (2% σ pour des e^- de 3 MeV) a été obtenue pour des blocs individuels. Le niveau de bruit de fond doit être réduit de plus d'un ordre de grandeur. Pour cette raison la collaboration envisage de sélectionner drastiquement les matériaux par des mesures de spectroscopie gamma avec des détecteurs HPGe, de construire un détecteur BiPo sensible à des contaminations de quelques $\mu\text{Bq/kg}$ dans les sources minces $\beta\beta$, d'isoler le détecteur de traces pour éviter l'émanation en Radon du reste des matériaux et de développer des détecteurs de Radon sensibles à quelques centaines de $\mu\text{Bq/m}^3$. La première étape de l'amélioration sera l'installation d'un démonstrateur contenant 7 kg de ^{82}Se au LSM en 2013 ; sa sensibilité à la $0\nu 2\beta$ ($7 \cdot 10^{24}$ ans for $T_{1/2}$), après 2 ans de prises de données serait suffisante pour exclure la revendication de découverte avec le ^{76}Ge . Le défi est d'atteindre 0 événement de bruit de fond pour une expérience de $\sim 10\text{kg}$ durant plusieurs années. Ceci n'a jamais été atteint jusqu'ici.

La technique bolométrique

Un détecteur bolométrique consiste en un absorbeur d'énergie couplé à un thermomètre. Le signal, collecté à des températures très basses (typiquement < 20 mK pour de grands bolomètres), correspond à une augmentation de température du détecteur provoquée par une interaction nucléaire. Le pulse thermique est mesuré par le thermomètre, qui est usuellement un cristal semi-conducteur dont la résistance augmente fortement lorsque la température décroît. Le courant polarisé permet la conversion de la variation de la résistance en un signal électrique. Des résolutions en énergie exceptionnellement élevées (0,05% σ à 2.5 MeV obtenu pour le TeO_2) et un large choix dans le matériau du détecteur (des bolomètres ont été réalisés pour 6 des candidats isotopes $\beta\beta$ les plus intéressants) sont les principales caractéristiques de cette approche, qui est bien adaptée aux exigences d'une expérience $0\nu 2\beta$ de grande sensibilité, basée sur la technique calorimétrique. Des cristaux ultra-purs avec des matériaux contenant des candidats isotopes $\beta\beta$ prometteurs peuvent croître jusqu'à des masses de 100-1000 g. Les modules de cristaux peuvent être multipliés pour atteindre des masses de 100-100kg, nécessaires pour explorer la hiérarchie inverse (IH).

Parmi les isotopes variés qui peuvent être étudiés avec les bolomètres, pour les expériences de grande taille le choix s'est porté jusque-là sur le TeO_2 (tellurite) naturel, qui possède à la fois des propriétés mécaniques et thermiques raisonnables et une abondance naturelle élevée (27% en masse) dans le candidat $0\nu 2\beta$ ^{130}Te . Cette caractéristique explique le succès de Cuoricino (actuellement l'expérience de $0\nu 2\beta$ la plus sensible avec NEMO-3, IGEX et la revendication de découverte controversée de Heidelberg-Moscow). Cuoricino a pris des données au Laboratoire du Gran Sasso (LNGS) entre 2003 et 2008 ; une exposition de 19,75 kg. an a permis de mettre une limite à 90% de niveau de confiance sur la demi-vie du ^{130}Te de 2.8×10^{24} ans, ce qui correspond à une limite sur $m_{\beta\beta}$ de 0,31-0,71 eV. CUORE, l'extension prévue de Cuoricino qui est faite par une collaboration Italie-USA doit prendre des données en 2014. CUORE est environ 20 fois plus grande que Cuoricino et a une sensibilité sur $m_{\beta\beta}$ de l'ordre de 50 meV. La source de bruit de fond dominant pour Cuoricino et CUORE, qui limite fondamentalement pour le moment leur sensibilité, est due à l'émission, par des contaminations radioactives à la surface de matériaux entourant les détecteurs, de particules α d'énergie dégradée. Ce mécanisme produit un bruit de fond continu en énergie de l'ordre de 0.1-0.05 coups/(keV kg an) dans la région du signal.

Le potentiel de la technique bolométrique peut être amélioré significativement si le matériau absorbeur d'énergie est un bolomètre scintillant à basse température. En fait, la détection simultanée de la lumière de scintillation et de la chaleur constitue un outil très puissant pour identifier la nature de la particule qui interagit et ainsi pour supprimer le bruit de fond. En particulier, une particule massive chargée peut être distinguée d'un électron ou d'un gamma à cause des quantités de lumière émises différentes pour une même chaleur déposée, comme cela avait été proposé il y a plus de 20 ans. Récemment, cette approche a été proposée pour étudier la $0\nu 2\beta$ du ^{82}Se (projet LUCIFER) avec des cristaux de ZnSe. Dans le cas de matériaux non-scintillants utilisés pour la $0\nu 2\beta$, l'identification de particules peut être effectuée par la détection de la lumière Cherenkov, beaucoup moins intense. Dans la technologie actuelle, la lumière est mesurée avec des bolomètres minces dédiés situés en face du bolomètre principal.

Les bolomètres scintillants qui contiennent un émetteur $0\nu 2\beta$ avec un $Q_{\beta\beta}$ au-delà de la raie γ de 2615 keV du ^{208}Tl sont des dispositifs très prometteurs pour de futures expériences. En effet, la région en énergie au-delà de 2615 keV est quasiment sans bruit de fond γ provenant de la radioactivité naturelle, mais est dominée par des particules α , comme le montre clairement l'expérience apportée par Cuoricino et la R&D de CUORE, d'où la puissance et le potentiel des bolomètres scintillants. Ils offrent une liberté raisonnable dans le choix du candidat, qui peut être sélectionné pour sa valeur de $Q_{\beta\beta}$ élevée, avec l'avantage supplémentaire de la reconnaissance et de la réjection des particules α . En France, un développement, basé sur la technique des bolomètres scintillants, a débuté, en partie en lien avec le projet LUCIFER et en partie en suivant une démarche originale qui utiliserait des cristaux de ZnMoO_4 pour des recherches avec l'isotope prometteur ^{100}Mo (figure 2).

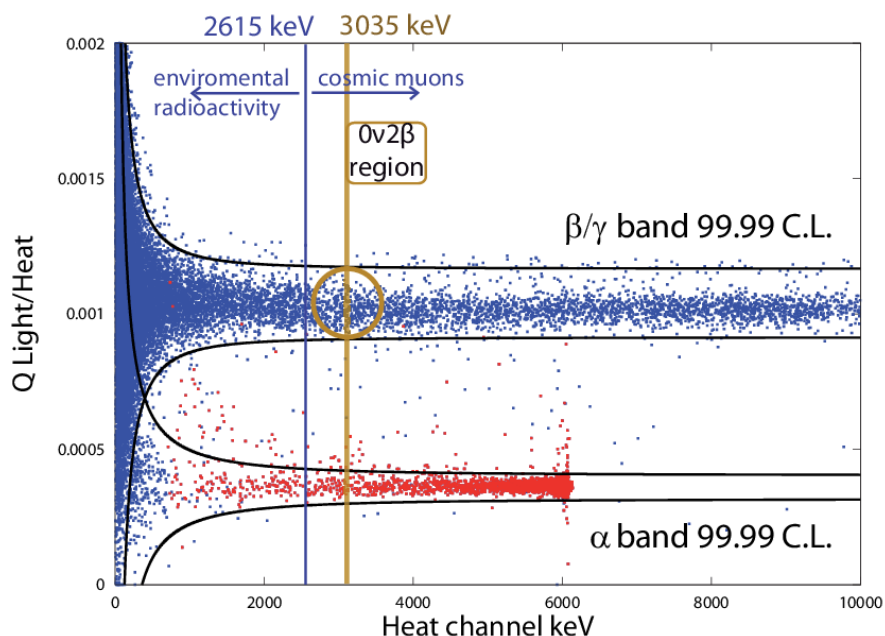


Figure 2 : discrimination α/β obtenue par un bolomètre scintillant de ZnMoO_4 réalisé au CSNSM et mis en froid en surface. Les α et les β peuvent être distinguées aussi par la forme des impulsions de la voie chaleur (rouge : α ; bleu : β , γ , muons)

Des évaluations préalables, basées sur des résultats expérimentaux avec de petits échantillons et des simulations Monte Carlo, montrent que des niveaux de bruit de fond de 10^{-3} – 10^{-4} coups/(keV kg an) sont atteignables, soit entre 1 et 2 ordres de grandeur plus faibles que dans la pure approche bolométrique. Le succès de la technique dépend de la capacité à réduire les contaminations internes en ^{214}Bi et en ^{208}Tl des cristaux et des matériaux avoisinants. Après une phase de R&D, déjà commencée, qui est prévue durer trois ans (2011-2013), le but de l'activité en France est de faire démarrer une expérience souterraine pilote avec une masse sensible de l'ordre de quelques kilos qui vise à démontrer le plein potentiel de cette approche, prélude à une possible recherche de nouvelle génération sensible à la hiérarchie inverse.

5 Conclusions

La physique des neutrinos a connu deux décennies riches en découvertes majeures, notamment celle des oscillations des neutrinos. Un ensemble cohérent de résultats expérimentaux a permis de résoudre l'énigme des neutrinos solaires et le déficit, connu depuis longue date, des neutrinos atmosphériques. Cela a démontré que les neutrinos oscillent et donc qu'ils ont une masse. C'est un premier élément très important qui montre que le modèle standard minimal est incomplet. Néanmoins, des nombreuses questions fondamentales restent ouvertes dans ce domaine, notamment en ce qui concerne le dernier angle de rotation de la matrice PMNS, θ_{13} , l'existence ou pas de phénomènes de violation de CP liés à cette matrice, le type de hiérarchie de masse, et *last but not least* la nature même du neutrino, Dirac ou Majorana.

Tout au long de ce chapitre nous avons montré comment la prochaine décennie verra les efforts se tourner vers quatre axes prioritaires d'investigation que nous allons résumer dans la suite.

La poursuite de l'exploration de la matrice PMNS avec les expériences en cours, Borexino, OPERA, T2K et Double Chooz.

Ces quatre expériences, avec pour trois d'entre elles (OPERA, T2K et Double Chooz) une forte implication des groupes français, sont actuellement en prise de données et cela pour les prochains trois à cinq ans. Borexino sonde les flux de neutrinos solaires pour la détermination des paramètres d'oscillation Δm^2_{21} et θ_{12} , et apporte des informations notables sur les mécanismes nucléaires à l'œuvre au cœur du Soleil. OPERA étudie les oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ et devrait pouvoir conclure sa prise de données en mettant en évidence l'apparition de ν_τ dans un faisceau de ν_μ , ce qui pour l'instant reste une hypothèse. T2K et Double Chooz ont déjà montré des premières indications d'un angle θ_{13} grand, proche de la limite supérieure. Il s'agit pour ces expériences de poursuivre la prise de données, pour Double Chooz avec la construction du laboratoire proche et la mise en service de son détecteur, et d'apporter une confirmation de ces indications, avec des mesures de plus grande précision. Signalons que la mesure de cet angle est d'une grande importance pour le programme futur d'expériences visant à étudier la violation de CP dans la matrice PMNS. Ce programme est particulièrement intéressant du fait que T2K et Double Chooz apportent un éclairage complémentaire sur θ_{13} , du fait des techniques orthogonales et de la mesure de phénomènes différents (apparition-disparition). Le programme de physique de T2K pourrait être poursuivi par une

prise de données en mode anti-neutrino, ensuite par une phase d'upgrade et une montée en puissance de JPARC.

L'étude des anomalies

Une série d'anomalies a été mise en évidence dans les études expérimentales des neutrinos. Les plus connues sont liées à l'expérience LSND, aux mesures de calibration de GALLEX et SAGE avec une source intense, et plus récemment à l'anomalie des mesures de flux de neutrinos avec des réacteurs. L'ensemble de ces anomalies ne se prête pas facilement à une interprétation globale. Néanmoins, certaines d'entre elles pourraient indiquer l'existence de neutrinos stériles avec une masse de l'ordre de l'eV. L'expérience NUCIFER initialement prévue pour la non-prolifération nucléaire pourrait donner des premières indications dans ce sens. D'autres expériences sont à l'étude, notamment avec des sources radioactives très intenses déployées dans des détecteurs existants (comme Borexino ou KamLAND) et avec des nouvelles mesures auprès de réacteurs, notamment à l'ILL. Il faut aussi évoquer l'anomalie de la vitesse super-luminique des neutrinos observés par OPERA. Si cela est confirmé par d'autres expériences (MINOS, T2K), et si aucune explication en terme d'erreur systématique expérimentale n'est trouvée, elle pourrait indiquer une violation de la relativité qui demanderait à être étudiée de façon plus approfondie.

Les expériences accélérateur à longue ligne de base couplées à des détecteurs de type Mégatonne

Si les premières indications d'un angle θ_{13} grand se confirment, on peut envisager une nouvelle étape dans l'exploration de la matrice PMNS avec comme axes la détermination de la hiérarchie de masse des neutrino et l'étude de la phase de violation de CP. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'un super-faisceau avec une puissance du MW et d'un détecteur lointain d'une masse de l'ordre de la Mégatonne. Sur ce programme pourraient se déployer des efforts considérables au niveau mondial, avec des projets aux USA (LBNE) et au Japon (Hyper-Kamiokande, avec un upgrade JPARC). Dans ces études, l'Europe possède des atouts considérables, en particulier avec la possibilité d'une ligne de base courte, CERN à Fréjus de 130 km, et celle d'une ligne de base très longue, CERN à Pyhäsalmi de 2500 km, proche de la distance « magique ». C'est sur ces deux options que travaille LAGUNA-LBNO, étude européenne qui rassemble la communauté intéressée par ces études. Celle-ci s'accorde pour souligner le rôle primordial du CERN dans ces projets et a privilégié une approche incrémentale, dans laquelle la masse des détecteurs augmente par palier successif, en permettant de moduler l'effort de construction. A chaque étape correspondent des objectifs de physique très clairs dans l'étude la matrice PMNS. Au programme avec un faisceau se couplent des études des neutrinos astrophysiques et la recherche de désintégration du proton. Une Lettre d'Intention devrait être soumise au CERN au cours de l'année 2012. Cet effort, qui voit une bonne participation de la communauté française, doit être suivi et soutenu, vu l'importance fondamentale de cet axe de recherche. Au niveau français, il conviendrait de soutenir aussi l'effort de R&D pour des détecteurs Mégatonne.

La recherche de désintégrations double beta sans neutrino

La recherche de désintégrations double beta sans neutrino est la seule à pouvoir nous renseigner sur la nature du neutrino : Dirac ou Majorana. En outre, elle peut établir le type de hiérarchie de masse en parallèle avec l'information que les mesures d'oscillations peuvent donner sur ce sujet crucial. Deux approches de détection ont été retenues par les laboratoires français. D'une part l'approche de

tracement et calorimétrie, en continuant une longue tradition qui a vu et voit la France à l'avant-garde dans la recherche de cette décroissance rare. Cette technologie est la seule qui permet d'accéder à tous les paramètres de l'état final à deux électrons. Après Nemo-3, le projet SuperNEMO se propose d'atteindre une sensibilité sur le neutrino de Majorana de l'ordre de 0,05 eV en 2016-2018 avec un scénario de mise en route séquentielle des modules de SuperNEMO. D'autre part, un développement extrêmement prometteur, basé sur la technique des bolomètres scintillants, a débuté très récemment, en partie en lien avec le projet LUCIFER et en partie en suivant une démarche originale qui utiliserait des cristaux de ZnMoO_4 pour des recherches avec l'isotope prometteur ^{100}Mo . Comme pour la technique à tracement et calorimétrie, plusieurs isotopes pourraient en principe être investigués, en donnant une redondance indispensable pour la découverte de la décroissance double beta.