
Conseil Scientifique de l'IN2P3
25-26 octobre 2018
Expérience SuperNEMO

Table des matières

1	Enjeux scientifiques	1
1.1	Physique du neutrino et décroissance double bêta	1
1.2	Etat de l'art de la recherche de la double désintégration bêta sans neutrinos	1
2	Projet	2
2.1	Le détecteur SuperNEMO	2
2.2	Sensibilités attendues	3
2.3	Productions scientifiques et retombées attendues	4
3	Genèse et calendrier	5
3.1	De NEMO-3 à SuperNEMO	5
3.2	Performances obtenues : résultats de la R&D	6
3.3	Répartition des responsabilités par pays	12
3.4	Intégration et mise en route	13
3.5	Calendrier	14
3.6	Evaluations et Productions scientifiques passées	15
4	État de l'art	19
5	Ressources et moyens	20
5.1	Ressources humaines	20
5.2	Ressources financières	20
6	Réalisations techniques	24
7	Auto-analyse SWOT	24
7.1	Forces	24
7.2	Faiblesses	24
7.3	Opportunités	24
7.4	Menaces	24
A	Liste de publications NEMO-3/SuperNEMO	26
A.1	Revue à comité de lecture	26
A.2	Actes de conférences	27
B	Thèses	28
C	Laboratoires et instituts de la collaboration SuperNEMO	30
D	Rapports de conseils scientifiques	30

1 Enjeux scientifiques

1.1 Physique du neutrino et décroissance double bêta

Ces dernières décennies ont été marquées par des avancées remarquables dans la compréhension des neutrinos laissant aussi apparaître avec elles certains questionnements. Ainsi, la découverte des oscillations, qui prouve que les neutrinos ont une masse, révèle une première faille dans le Modèle Standard qui s'accompagne d'un certain nombre de questions : quelle est la masse de chaque neutrino ? Quel mécanisme peut expliquer les très faibles masses attendues ? Ce mécanisme fait-il appel à un neutrino de Majorana ou de Dirac ? Certaines anomalies dans les mesures d'oscillations peuvent-elles s'expliquer par l'existence d'un ou plusieurs neutrinos stériles ? Existe-t-il une violation de la symétrie CP pour les neutrinos ?

L'observation de la décroissance double bêta sans émission de neutrinos $0\nu\beta\beta$ permettrait de déterminer si le neutrino est de Majorana. Le lien qui existe entre la demi-vie de cette décroissance, la masse des neutrinos et les paramètres de mélange entre neutrinos, en font aussi un outil complémentaire sensible à la détermination de la masse absolue des neutrinos, à leur hiérarchie de masse, à la violation de CP ou au nombre de familles de neutrinos. La décroissance $0\nu\beta\beta$ pourrait également avoir lieu dans le cadre d'extensions du Modèle Standard faisant appel aux courants droits, aux particules supersymétriques ou à l'émission de Majorons (bosons associés à la violation de la conservation du nombre leptonique). Ainsi, au-delà de son impact direct sur la physique du neutrino, la décroissance $0\nu\beta\beta$ ouvre le champ à de nouvelles lois de Physique qui pourraient par exemple expliquer l'origine de l'asymétrie matière-antimatière.

1.2 Etat de l'art de la recherche de la double désintégration bêta sans neutrinos

Jusqu'à présent, les sensibilités des expériences ont uniquement permis de fixer des limites sur la demi-vie de la décroissance $0\nu\beta\beta$. Les résultats sont habituellement comparés pour le processus le plus « commun » correspondant à l'échange d'un neutrino léger par courant V-A. Le tableau 1 donne, pour chacun des isotopes étudiés, la meilleure sensibilité actuelle obtenue en terme de demi-vie $T_{1/2}^{0\nu}$ et de masse effective $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ reliées par : $(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = g_A^4 G_{0\nu} M_{0\nu}^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$, avec g_A la constante de couplage vectoriel-axial, $G_{0\nu}$ l'espace de phase et $M_{0\nu}$ l'élément de matrice nucléaire.

Isotope	$Q_{\beta\beta}$ (keV)	Expérience	Lieu	Masse (kg)	Expos. (kg.an)	$T_{1/2,min}^{0\nu}$ (10^{24} ans)	$m_{\beta\beta}^{max}$ (meV)
^{48}Ca	4268	CANDLES-III	Japon	0,27	0,045	0,062 [1]	3400-14900
^{76}Ge	2039	GERDA	Italie	35	58,9	90 [2]	112-232
^{82}Se	2998	CUPID-0	France	5,13	3,44	2,4 [3]	376-730
^{96}Zr	3355	NEMO-3	France	0,0094	0,05	0,0092 [4]	4000-23000
^{100}Mo	3034	NEMO-3	France	7	34,3	1,1 [5]	332-614
^{116}Cd	2813	AURORA	Italie	0,35	0,35	0,19 [6]	960-1480
^{130}Te	2527	CUORE	Italie	206	115,9	15 [7]	134-369
^{136}Xe	2457	EXO200	USA	76	177,6	18 [8]	143-364
^{136}Xe	2457	KLAND-Zen	Japon	350	126,0	100,7 [9]	59-149
^{150}Nd	3371	NEMO-3	France	0,037	0,19	0,02 [10]	1590-5220

TABLE 1 – Meilleures sensibilités actuelles sur la recherche de la décroissance $2\beta 0\nu$ par échange de neutrino léger (V-A) pour les principaux isotopes d'intérêt. La sensibilité sur la masse effective $m_{\beta\beta}$ est calculée à partir des valeurs d'espace de phase publiées dans [11] et les éléments de matrices nucléaires donnés en [12][13][14][15][16][17][18] [19][20], avec $g_A=1,27$.

Certaines expériences, et en particulier NEMO-3 qui a accès à la topologie des événements, ont également la possibilité d'étudier des processus plus exotiques que proposent certains modèles au-delà du Modèle Standard. Les meilleures sensibilités sur ces processus sont présentées dans le tableau 3.1.

La mesure précise de la demi-vie de la décroissance $2\nu\beta\beta$ est également essentielle pour estimer le bruit de fond de toutes les expériences double bêta. Le très faible taux d'événements de bruit de fond de l'expérience NEMO-3 dans toute la gamme d'énergie des électrons émis par la décroissance $2\nu\beta\beta$ a permis la mesure la plus précise des demi-vies $2\nu\beta\beta$ de 7 des 9 principaux isotopes d'intérêt [24].

Enfin, la possibilité pour certains noyaux de décroître préférentiellement vers certains niveaux excités lors de la désintégration $0\nu\beta\beta$ reste une question ouverte à explorer dans les expériences en cours et à venir.

Processus	Paramètres	Meilleur résultat (90%CL)	Expérience
$2\beta 0\nu$ V+A	$\langle \lambda \rangle$	$\langle (0,9-1,3) 10^{-6}$	NEMO-3 [5]
$2\beta 0\nu$ V+A	$\langle \eta \rangle$	$\langle (0,5-0,8) 10^{-8}$	NEMO-3 [5]
$2\beta 0\nu \chi^0$ n=1	g_{ee}	$\langle (0,45-1,2) 10^{-5}$	KamLAND-Zen [21]
$2\beta 2\nu$ bosonic ν	$\sin^2 \chi$	$< 0,27$	NEMO-3 [22]
$2\beta 2\nu$ LIV	$a_{of}^{(3)}$	$=[-4,2 ; 3,5] 10^{-7}$	NEMO-3 [22]
$4\beta 4\nu$ ^{150}Nd	$T_{2\nu}^{1/2}$	$> (1,1-3,2) 10^{21}$	NEMO-3 [23]
$2\beta 0\nu$ SUSY	λ'_{111}/f	$(4,4-6,0) 10^{-2}$	NEMO-3 [5]

TABLE 2 – Meilleurs résultats des expériences double bêta sur les paramètres associés à la recherche des processus par échange de neutrinos par courant droit V+A, émission de Majoron χ , test de l’existence d’une composante bosonique du neutrino (bosonic), violation de l’invariance de Lorentz (LIV), quadruple bêta et processus supersymétrique.

2 Projet

2.1 Le détecteur SuperNEMO

2.1.1 Approche trajectographe-calorimètre

L’expérience SuperNEMO s’appuie sur une technologie de détection dite « tracko-calorimètre » qui permet non seulement de mesurer l’énergie des électrons émis lors des processus de double désintégration bêta grâce à un calorimètre dédié, mais également d’identifier ces électrons au moyen d’un trajectographe, la source d’émetteur $\beta\beta$ étant quant à elle passive et distincte de ces deux unités de détection. Cette approche se distingue historiquement des détecteurs dits *calométriques purs* pour lesquelles la source $\beta\beta$ coïncident avec le volume de détection (Germanium, bolomètres, TPC, scintillateur liquide). A ce titre, c’est la seule expérience qui met en œuvre une chambre à fils (grande granularité).

Cette instrumentation, dont le principe est hérité des détecteurs précédents NEMO-2 (1992-1998) et NEMO-3 (2004-2011), a permis d’atteindre des performances remarquables quant à l’identification des bruits de fonds : gamma / électron / positron / alpha. L’expérience NEMO-3 a ainsi bénéficié d’un taux de bruit de l’ordre de 10^{-3} coups/kev/kg/an dans la région d’intérêt pour la recherche du processus $0\nu\beta\beta$ du ^{100}Mo .

Une difficulté inhérente à cette approche tient au fait qu’il faut assembler un détecteur à partir de trois objets distincts (source, trajectographe, calorimètre) avec leurs interfaces et des dispositifs de protections additionnels (bobine, blindage, tente anti-radon) dans un contexte *ultra-bas bruit de fond*.

L’idée de la collaboration SuperNEMO est toutefois de pousser cette technique au maximum pour améliorer encore sa capacité à identifier et réduire les bruits de fond tout en conservant la faculté de détecter et d’identifier formellement un *golden event* signant un processus $0\nu\beta\beta$.

Un autre trait intéressant de cette approche expérimentale est de pouvoir étudier différents isotopes émetteurs $\beta\beta$ comme il a démontré dans NEMO-3.

2.1.2 Le détecteur

Le détecteur SuperNEMO est divisé en sous-détecteurs ayant chacun une fonction spécifique. Une vue éclatée du détecteur est présentée en figure 1. Il pèse environ 32 tonnes et ses dimensions sont environ 6,2 m de large, 2,1 m de profondeur et 4,1 m de haut. Au centre du détecteur on trouve le cadre source qui contient 34 bandes de sélénium enrichi et purifié pour une masse totale de 6 kg d’isotope ^{82}Se , deux bandes de cuivre ultra-pur pour vérifier le bruit de fond et le système de déploiement des sources de calibrations. De part et d’autre de ce plan de source, se trouvent deux détecteurs de traces. Il s’agit de chambres à fils verticales fonctionnant dans un mélange d’hélium et d’alcool. Les traces d’électrons seront reconstruites à trois dimensions sur environ 45 cm de profondeur par des cellules de 44 mm de diamètre. Les deux détecteurs comportent ainsi 2034 cellules.

Le volume de détection de traces est enfin refermé par deux murs constituant le calorimètre principal. Il sera l’élément clé pour la mesure de l’énergie des électrons émis par les désintégrations. Les 520 modules optiques qu’il comporte sont constitués de photomultiplicateurs huit pouces très basse radioactivité directement couplés à de larges blocs de scintillateurs plastiques (environ 12 dm^3). Le volume de détection est fermé sur les autres côtés par un calorimètre secondaire de 192 modules optiques essentiellement dédié au contrôle du bruit de fond, ou à la détection de particules gamma souvent associées aux bruits de fond ou l’étude de désintégrations vers des états excités.

Ce détecteur sera enfin entouré d’une bobine pour courber les trajectoires des électrons, d’une tente anti-radon, d’un blindage gamma et neutrons d’environ 200 tonnes. L’électronique d’acquisition est complètement déportée de ces éléments.

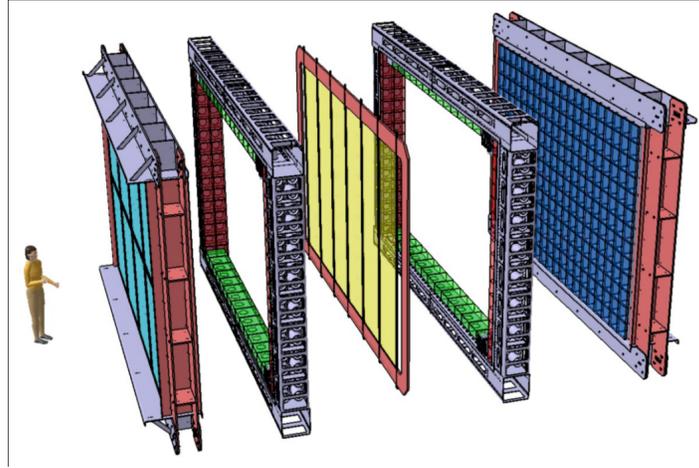


FIGURE 1 – Vue éclatée du détecteur SuperNEMO (module démonstrateur) avec le cadre source au centre entouré des deux détecteurs de traces et des murs de calorimètre.

2.2 Sensibilités attendues

Le module démonstrateur SuperNEMO a été conçu pour démontrer la faisabilité d’une expérience modulaire de grande taille, capable de mettre en œuvre une exposition à l’échelle de $m \times t = 500$ kg.année. La collaboration a établi les performances d’un tel détecteur en terme de sensibilité au processus $0\nu\beta\beta$ du ^{82}Se [42]. Ces résultats ont été obtenus au moyen des outils de simulation développés pendant la phase de R&D, dans le cadre d’hypothèses utilisant les contraintes établies sur la radiopureté du détecteur lors d’études préliminaires (mesures et sélection des matériaux) et les choix de conception du détecteur (géométrie, instrumentation).

Pour rechercher un signal $\beta\beta$ en provenance de la source enrichie placée au centre du détecteur, on utilise la topologie dite (2e) qui signe de manière privilégiée la cinématique des événements de désintégration $0\nu\beta\beta$ avec deux traces d’électrons identifiées dans le trajectographe et associées à une mesure d’énergie dans le calorimètre (figure 2 à gauche). La figure 2 à droite montre les distributions en énergie totale des électrons pour les processus concurrents dans ce canal. Le processus $0\nu\beta\beta$ (pour le mécanisme d’échange de neutrino Majorana léger) se manifeste préférentiellement dans une fenêtre autour du $Q_{\beta\beta}$ ¹. La simulation permet d’établir les critères de sélection optimaux dans ce canal d’analyse pour maximiser la sensibilité ultime du détecteur au processus $0\nu\beta\beta$ en présence de bruits de fond dont l’amplitude est fixée par un modèle dédié².

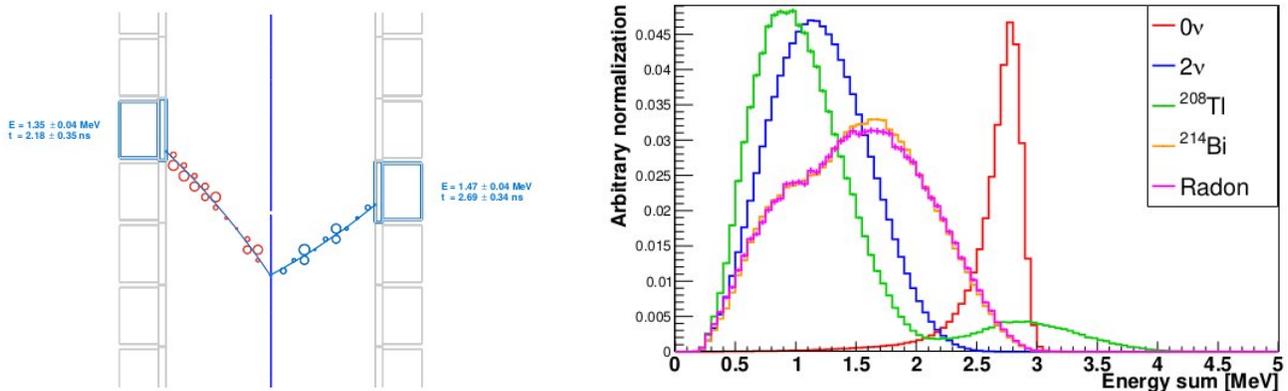


FIGURE 2 – Gauche : topologie (2e) pour la recherche du signal $0\nu\beta\beta$ dans un module de SuperNEMO. Droite : distributions en énergie somme de deux électrons attendues pour le processus $0\nu\beta\beta$ du ^{86}Se et les principaux processus de bruit de fond (P.d.f. non normalisées).

1. Cette fenêtre de sélection est corrigée en position et en largeur pour tenir compte des effets de pertes en énergie des électrons émis et de la résolution expérimentale du calorimètre

2. Le modèle de bruit de fond ici utilisé est établi à partir des contraintes de radiopureté fixées par le programme de R&D. Le modèle réaliste sera précisé grâce à la capacité du détecteur SuperNEMO à mesurer ses propres contaminations par une analyse multi-topologies autorisée par la technique de détection.

A titre d'exemple, la table 3 présente, pour un choix particulier de coupures topologiques et une exposition de 17,5 kg.année, les nombres d'événements attendus pour différents bruits de fond dans le démonstrateur SuperNEMO, ainsi que l'efficacité de détection du processus $0\nu\beta\beta$ du ^{82}Se .

Bruit de fond				Signal	
$2\nu\beta\beta$	^{208}Tl	^{214}Bi	Radon	Total	Efficacité $0\nu\beta\beta$ $\varepsilon_{0\nu}$
0,4	0,05	0,05	0,24	0,75	15 %

TABLE 3 – Expérience SuperNEMO pour 17,5 kg(^{82}Se) \times année : nombres d'événements de bruits de fond attendus et efficacité au processus $0\nu\beta\beta$ dans le canal ($2e$).

Avec ces hypothèses simplifiées, le nombre total d'événements de bruit de fond attendu est inférieur à un événement, si bien qu'on peut estimer la sensibilité ultime de l'expérience en considérant le cas où aucun événement n'est observé ($n_{0\nu}^{max}=2,3$ événements exclus à 90 % CL) :

$$T_{0\nu}^{1/2,lim} = \frac{\log 2 N_A \varepsilon_{0\nu} t m}{M_{Se} n_{0\nu}^{max}} \simeq 5 \cdot 10^{24} \text{ années}$$

Des méthodes statistiques plus élaborées (analyses multivariées) ont été explorées pour tirer le meilleur parti de la richesse des informations cinématiques disponibles dans SuperNEMO, en prenant en compte les efficacités de reconstruction topologique. La table montre la sensibilité estimée pour le démonstrateur SuperNEMO avec une exposition de 17,5 kg.années et pour le détecteur complet avec une exposition de 500 kg.années [42].

Exposition	17,5 kg.année	500 kg.année
$T_{0\nu}^{1/2}$	$> 5 \cdot 10^{24}$ années	$> 5 \cdot 10^{25}$ années
$\langle m_{\beta\beta} \rangle$	240-460 meV	82-160 meV

TABLE 4 – Sensibilité de l'expérience SuperNEMO pour le processus $0\nu\beta\beta$ du ^{82}Se .

2.3 Productions scientifiques et retombées attendues

2.3.1 Publications de Physique

- Résultats de la recherche de la décroissance $2\beta 0\nu$ du ^{82}Se : par échange de neutrino léger, courant droit, émission de Majoron, mécanismes de super-symétrie, états excités.
- Mesure de la décroissance $2\beta 2\nu$ du ^{82}Se à haute précision : demi-vie, cinématique (énergies individuelles et distribution angulaire)
 - Détermination du mécanisme de transition SSH ou HSD, décroissance vers les états excités,
 - Possible détermination de la constante de couplage vectoriel-axial g_A pour la décroissance double bêta par la mesure des énergies individuelles des électrons.
- Test de la violation de l'invariance de Lorentz.
- Neutrino bosonique.
- Premières limites sur la recherche de la décroissance double bêta (avec et sans neutrinos) avec électron lié.

2.3.2 Publications techniques

- Performances techniques du démonstrateur SuperNEMO : calorimètre, chambre à fils, radiopureté, électronique.
- Nouvelles techniques développées dans le cadre de SuperNEMO : détection et contrôle du radon, méthode de purifications chimiques, méthodes d'enrichissement d'isotopes à haute température (déjà publiés : détecteur BiPo, calorimètre).
- Conclusions sur l'extrapolation de l'approche instrumentation de SuperNEMO pour sonder la hiérarchie inverse.

2.3.3 Retombées techniques vers l'industrie

- Développement de simulations (optiques/GEANT4, Electromagnétiques-Bayeux/GEANT4) utilisées par l'industrie (CARMELEC, CERAP).
- Développement d'outils de caractérisation de photodétecteurs : faisceau d'électrons utilisés par les industriels (CARMELEC, NUVIA).
- Développement d'un détecteur pour la radioprotection bêta/gamma aujourd'hui sur catalogue (CARMELEC/EDF).
- Etude de la cible de conversion électron/X de l'accélérateur FELIX (CERAP/ATRON) pour l'étalonnage de radiomètres.
- Caractérisation de faisceaux de protons pour la proton-thérapie (UCL).
- Détection du Radon, concentration et piégeage du radon.
- Nouvelles méthodes d'enrichissement d'isotopes à haute température.
- Nouvelle méthode de purification chimique par chromatographie.
- Méthodes d'authentification de produits par spectrométrie gamma bas bruit de fond.

3 Genèse et calendrier

Le projet SuperNEMO prend sa source en 2004 [25] alors que le détecteur NEMO-3 a commencé à prendre des données. La collaboration NEMO envisage alors la conception d'une expérience $\beta\beta$ de nouvelle génération, utilisant une approche expérimentale similaire à celle de NEMO-3, qui serait capable de gagner deux ordres de grandeur en sensibilité au processus $0\nu\beta\beta$ et, dans le contexte de l'époque, confirmer ou infirmer les conclusions expérimentales de l'expérience Heidelberg-Moscou [29].

Débute alors une longue période de R&D (2004-2013) pendant laquelle, après accréation de nouveaux collaborateurs (Royaume-Uni, USA, Espagne. . .) à son noyau historique (France, Russie. . .), la collaboration NEMO travaille à améliorer chacun des aspects expérimentaux identifiés comme décisifs pour atteindre une sensibilité autour de 10^{26} années pour la demi-vie du processus $0\nu\beta\beta$ avec des isotopes tels que le ^{82}Se , le ^{48}Ca ou le ^{150}Nd .

Ce long travail a conduit la collaboration à proposer la construction d'un module démonstrateur pour établir la faisabilité d'un détecteur modulaire capable d'accueillir 100 kg de source $\beta\beta$ avec des performances accrues par rapport à NEMO-3 : SuperNEMO.

Le projet de démonstrateur SuperNEMO a été présenté en mai 2011 lors du Conseil Scientifique de l'IN2P3 [26].

3.1 De NEMO-3 à SuperNEMO

L'expérience NEMO-3, avec 6,9 kg de ^{100}Mo , a montré la possibilité pour une expérience de type *tracko-calorimétrie* d'atteindre un très bas niveau de bruit de fond issu de la radioactivité naturelle. En effet, la capacité d'une expérience double-bêta à rejeter le bruit de fond en détectant toute particule (γ , α) émise simultanément avec les électrons est un atout décisif, comme le montre la table 5 [27]. Aucun événement de signature $\beta\beta$ n'a été sélectionné dans la fenêtre [3,2-10] MeV pour une exposition de 47 kg.y, ce qui constitue un élément très prometteur pour une phase d'exploitation du démonstrateur SuperNEMO avec un isotope $\beta\beta$ de $Q_{\beta\beta}$ élevé, tel le ^{48}Ca , le ^{96}Zr ou le ^{150}Nd .

Bruit de fond	Activité ou demi-vie mesurée avec NEMO-3	Taux de bruit de fond (cts./keV/kg/an)
$2\nu\beta\beta$	$6,6 \cdot 10^{18}$ y	$6,2 \cdot 10^{-4}$
^{222}Rn dans le tracker	6 mBq/m^3	$2,3 \cdot 10^{-4}$
^{214}Bi interne aux sources	$220 \text{ } \mu\text{Bq/kg}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
^{208}Tl interne aux sources	$113 \text{ } \mu\text{Bq/kg}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

TABLE 5 – Activités ou demi-vie des bruits de fond mesurés par NEMO-3 avec le ^{100}Mo et contributions au bruit de fond.

En outre, la mesure des bruits de fond dans des canaux de haute statistique a permis d'étudier finement leur origine et leur localisation : contamination interne des sources, contamination par dépôt dans le trajectographe, identification de « points chauds » . . .

La capacité du détecteur NEMO-3 de mesurer différentes observables cinématiques (énergie totale, énergies individuelles, distribution angulaire) a fait la démonstration du fort potentiel de cette technique pour étudier différents mécanismes avec des signatures variées comme présentés dans le tableau .

Ces spécificités, pour un détecteur aux performances encore améliorées, ouvrent des perspectives uniques d’investigation expérimentale dans un contexte théorique lié à la recherche d’événements rares en constante évolution : problème du quenching de g_A pour la $0\nu\beta\beta$ (2013), possibilité de certaines décroissances $\beta\beta$ préférentielles vers des états excités du noyau fils. . .

La $0\nu\beta\beta$ du ^{100}Mo a été exclue par NEMO-3 à 90 % de niveau de confiance pour une demi-vie de $1,1 \cdot 10^{24}$ années et une masse effective de $[0,33-0,62]$ eV. Le spectre du ^{100}Mo au-delà de 2 MeV est présenté dans la figure 3.

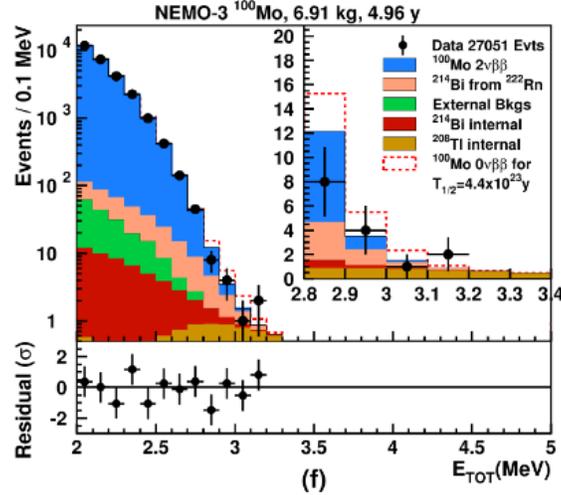


FIGURE 3 – Spectre $\beta\beta$ mesuré par NEMO-3 avec le ^{100}Mo au-delà de 2 MeV et contributions attendues des bruits de fond.

La figure 3 illustre les éléments d’amélioration clés pour SuperNEMO (voir table 6) :

- le bruit de fond $2\nu\beta\beta$ peut être réduit d’un facteur 14 par le choix de l’isotope ^{82}Se au lieu du ^{100}Mo . Il peut être encore diminué en améliorant la résolution en énergie du détecteur. D’une part, la perte en énergie des électrons $\beta\beta$, depuis leur production jusqu’à leur détection doit être minimisée en réduisant l’épaisseur des feuilles sources et en minimisant la quantité de matière dans le trajectographe. D’autre part, la résolution énergie du calorimètre doit être améliorée, typiquement d’un facteur 2 par rapport à NEMO-3.
- comme pour la $2\nu\beta\beta$, les bruits de fond issus de la radioactivité naturelle doivent être réduits de plus d’un ordre de grandeur. Ainsi l’activité en ^{222}Rn du trajectographe doit être réduite d’un facteur au moins 40. L’activité en ^{214}Bi (en ^{208}Tl) des sources doit être diminuée d’un facteur supérieur à 110 (56).

	Valeur obtenue avec NEMO-3	Spécification pour SuperNEMO
Résolution en énergie du calorimètre (FWHM à 1 MeV)	14-17 %	8 %
Activité en ^{222}Rn du tracker	6 mBq/m ³	< 0,15 mBq/m ³
Activité en ^{214}Bi des sources	220 $\mu\text{Bq/kg}$	< 2 $\mu\text{Bq/kg}$
Activité en ^{208}Tl des sources	113 $\mu\text{Bq/kg}$	< 10 $\mu\text{Bq/kg}$

TABLE 6 – Comparaison des paramètres obtenus par NEMO-3 avec les spécifications pour SuperNEMO [28].

3.2 Performances obtenues : résultats de la R&D

3.2.1 Source

Pour la fabrication des feuilles source de NEMO-3, le laboratoire ITEP (Institute for Theoretical and Experimental Physics à Moscou, Russie) avait développé une technique utilisant l’isotope $\beta\beta$ à installer dans le détecteur, de la colle PVA (Alcool PolyVinylique), le tout entouré d’une feuille de Mylar de 12 microns d’épaisseur microperforée appelée « backing film ». Une nouvelle R&D a été entreprise pour augmenter la radiopureté de ces feuilles. Le LAPP a conçu un nouveau processus de fabrication qui consiste à préparer des pavés de ^{82}Se -PVA autoporteurs qui sont ensuite ensachés dans du

Mylar non perforé donc moins sujet à contamination. L'ensemble des feuilles sources installées dans le détecteur contient environ 6 kg de ^{82}Se . Elles sont composées essentiellement de cet isotope, avec 10 % de colle PVA, pour une épaisseur moyenne de 300 μm , le tout entouré d'un film de Mylar de 12 μm d'épaisseur pour la tenue mécanique. Ces feuilles sont longues de 2,7 m, larges de 13,5 cm. Sur les 34 feuilles de ^{82}Se qui seront installées, 23 ont été produites au LAPP et 11 à ITEP. Dix-huit de ces feuilles ont été fabriquées avec la méthode déjà utilisée sur les expériences NEMO des précédentes générations. Les 16 autres feuilles ont été fabriquées par la méthode innovante développée au LAPP. En plus de la contrainte de travailler en salle blanche et avec du matériel radiopur, une des principales difficultés était le fait que le Se avait été purifié par différentes méthodes, chacune produisant une qualité de poudre différente (granularité, forme de grains...), nécessitant une préparation spécifique. Un de ces lots purifié à Dubna (Russie) par une toute nouvelle méthode universelle qui ne dépend pas de l'isotope a démontré des mesures de radiopureté avec les meilleures performances. Ce travail a été possible grâce à une étroite collaboration entre le LSM, Dubna, ITEP et Texas. La production des feuilles source s'est terminée le 6 octobre 2017. Elles ont toutes été installées au cœur du détecteur le 24 septembre 2018³ (figure 4).

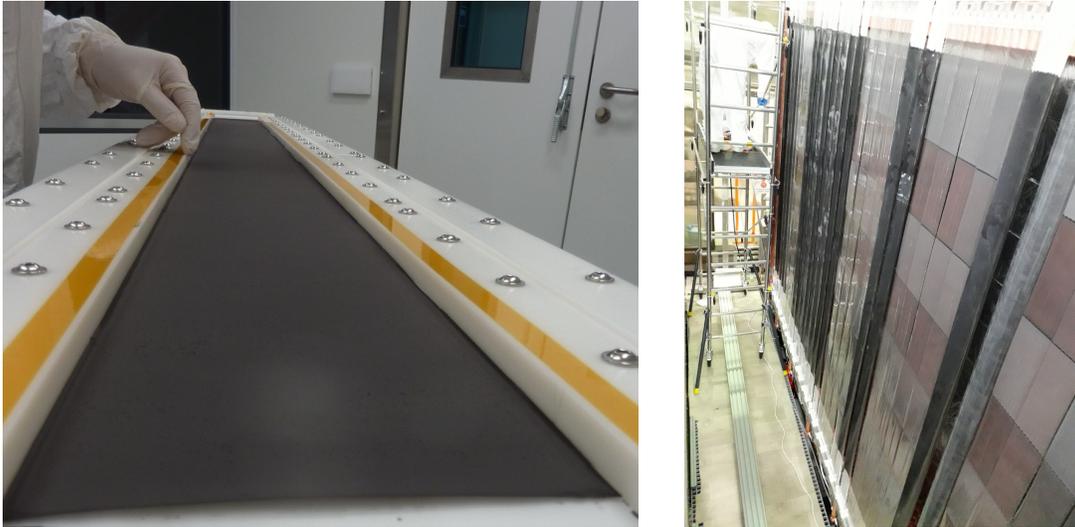


FIGURE 4 – Fabrication des sources de SuperNEMO et installation au LSM (septembre 2018).

3.2.2 Trajectographe

Le trajectographe de SuperNEMO permet de reconstruire la trace des particules chargées à l'intérieur du détecteur. Il s'agit d'un ensemble de cellules à dérives en régime Geiger alignées verticalement de chaque côté des feuilles sources (2 modules de $9 \times 113 = 2034$ cellules). Chaque cellule est composée d'un fil en acier inoxydable de 40 μm porté à un potentiel de 1700 V, entouré de 12 autres fils reliés à la masse et partagés avec les cellules voisines.

Afin d'assurer les meilleures performances du trajectographe en terme de fonctionnement et de radiopureté, les années de R&D ont abouti à la mise en place du processus de construction suivant :

- (a) contrôle et sélection des composants par mesure HPGe.
- (b) nettoyage des composants dans des récipients à ultrasons, incluant un système dédié pour les bobines de fils des cellules (déroulage, nettoyage, rinçage, séchage et enroulage).
- (c) contrôle de la qualité du fil anodique; le fil est déroulé au centre d'une cellule Geiger en fonctionnement. La mesure du taux de comptage et de la qualité des signaux permet d'identifier notamment des imperfections de surfaces qui permet de rejeter certains lots de fils avant construction des cellules (1,5 km/jour).
- (d) construction des cellules par un robot tisseur dans une salle propre et assemblage en cassette de 18 cellules (2×9) (1 cassette / jour).
- (e) installation de la cassette dans un tank hermétique pour tester le fonctionnement correct des 18 cellules (1 cassette / jour).

Les travaux de R&D ont permis de garantir un régime de fonctionnement plus stable avec un plateau plus large de 200 à 300 volts comparé aux cellules de NEMO-3 (50 V). La résolution spatiale obtenue avec une de cellule prototype

3. Pour plus de détails, se référer à la publication IN2P3 sur la fin de production des feuilles source parue le 12 janvier 2018 (http://in2p3.fr/recherche/actualites/2018/nouvelle_feuillessource_supernemo.html)

plus longue que celle du démonstrateur (3,7 m) et que celle de NEMO-3 (2,9 m) est de $\sigma_t = 0,7$ mm et $\sigma_h = 13$ mm. Ces résolutions sont très proches de celle de NEMO-3 avec des cellules plus longues et plus larges (largeur = 44 mm) que NEMO-3 (largeur = 30 mm et hauteur = 2,7 m). Les premiers tests de commissioning réalisés sur les 3/4 du trajectographe du SuperNEMO ont montré que plus de 99 % des cellules étaient opérationnelles.

3.2.3 Calorimètre

Le calorimètre de SuperNEMO permet la mesure du temps de vol et de l'énergie cinétique des particules traversant le détecteur. Il est constitué de 712 blocs de scintillateur plastique d'un volume de 10 L individuellement couplé à un photomultiplicateur 8" ou 5". Ces compteurs à scintillation sont assemblés sous forme de murs, deux principaux de part et d'autre des feuilles sources ainsi que tout autour du trajectographe pour une couverture quasiment totale pour toute particule entrant ou sortant du détecteur.

Une des grandes réussites de la R&D SuperNEMO fut l'amélioration de la résolution en énergie du calorimètre, en partant avec NEMO-3 de 14 % FWHM à 1 MeV pour obtenir 8 % pour SuperNEMO (fig. 5), ce qui signifie que le taux de photons de scintillation collectés a été quadruplé[33]. Les travaux de R&D ont porté sur la composition des scintillateurs (production de lumière et transparence), la collection de la lumière (géométrie, états des surfaces, réflecteurs et interfaces optiques) et la photodétection (nouvelle photocathode, efficacité de collection des photoélectrons), en collaboration avec des producteurs de scintillateurs (Nuvia, Eljen, ...) et de photomultiplicateurs (Photonis, Hamamatsu[40],...).

La résolution en temps est un critère important pour la mesure du temps de vol des particules afin de séparer les topologies d'événements internes aux feuilles sources des événements externes. Le haut rendement lumineux et l'utilisation de PM 8" hémisphériques conduisent à une résolution de l'ordre de $\sigma=400\pm90$ ps pour des électrons de 1 MeV, ce qui est satisfaisant pour les performances de SuperNEMO.

Afin de garantir les performances lors de la construction du calorimètre au CENBG, chaque scintillateur a été nettoyé, habillé de Teflon et Mylar puis couplé à un photomultiplicateur en salle propre. Une mesure sous faisceau d'électrons a ensuite été réalisée afin de contrôler la linéarité et l'uniformité de la réponse sur la face d'entrée des scintillateurs pour des électrons de 0,4 à 1,9 MeV. Un dernier test fût enfin effectué au Laboratoire Souterrain de Modane pour vérifier le bon fonctionnement après transport et juste avant intégration dans le détecteur.

L'étalonnage en énergie et l'estimation de la résolution en énergie sont aussi cruciaux pour la détection des événements et en particulier pour ceux provenant de la double désintégration sans neutrinos. Pour cela il est nécessaire de réaliser des étalonnages réguliers contrôlant les éventuels changements de la réponse du détecteur et en particulier du gain des photomultiplicateurs. Un système d'étalonnage absolu en énergie, automatisé, a été installé dans le détecteur : 42 sources de ^{207}Bi sont placées entre les feuilles sources $\beta\beta$ organisées en groupes de 7 sources espacées de 42,5 cm. Les électrons de conversion interne émis par ces sources permettent un étalonnage en énergie sur les trois pics à 482 keV, 976 keV et 1682 keV, couvrant ainsi la gamme d'énergie des électrons provenant de la désintégration double bêta. Avec un rythme d'étalonnage toutes les deux semaines, d'une durée de 15 heures environ, il sera possible d'estimer la position du pic à 976 keV avec une précision meilleure que 1 % et la résolution de ce pic (FWHM) avec une précision au niveau de quelques %. Entre deux étalonnages, la réponse du détecteur sera également suivie par un autre système : le LIS (Laser Injection System), composé de 20 LEDs UV couplées à des fibres optiques qui illuminent tous les modules optiques. Avec ce système, il sera possible de tester quotidiennement la linéarité des photomultiplicateurs et de contrôler ainsi les variations éventuelles de la réponse en énergie du détecteur au niveau du %.

3.2.4 Protections

Afin de signer complètement les événements de double désintégration bêta à deux électrons et de rejeter les bruits de fond (électrons traversants ou création de paires e^+e^-) il est nécessaire de fournir un champ magnétique d'environ 25 G à l'intérieur du détecteur de traces. Pour ce faire une bobine entoure le détecteur SuperNEMO. Cette bobine reprend le principe et les éléments de la bobine de l'expérience précédente (NEMO-3). Elle est constituée de fils de cuivre de section carrée de 1×1 cm² et de plaques de retour de champ latérale comme on peut le voir sur la figure 6 à gauche. Le retour de champ magnétique haut et bas est assuré par la structure en fer pur des sous-détecteurs.

Pour permettre l'intégration des différents sous-détecteurs et assurer son positionnement, le démonstrateur de SuperNEMO est maintenu par une structure en acier à base de poutres type IPN. Cette structure sert également de soutien au système de déploiement des sources de calibration mais aussi à la tenue du blindage. Ce dernier servira à supprimer le bruit de fond environnant le détecteur et comporte deux parties principales. La première est un blindage d'environ 20 cm d'épaisseur en fer pour se protéger des rayonnements gammas. Il est présenté sur la figure 6 à droite. Le second blindage sera constitué de cuves d'eau en polyéthylène et de plaques de polyéthylène boré. Il permettra de ralentir et capturer les neutrons.

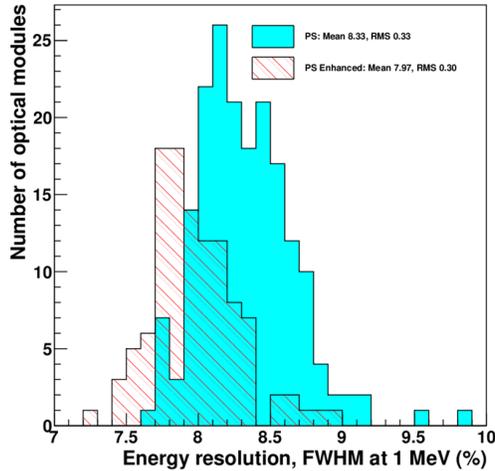


FIGURE 5 – Résolution en énergie des modules optiques du démonstrateur. Les derniers batches de scintillateur obtenus (*enhanced PS*) ont une composition améliorée qui impacte nettement la résolution énergie.

3.2.5 Electronique

En raison du grand nombre de voies à traiter (720 voies calorimètre et 6102 voies tracker), la collaboration a choisi de développer une électronique fortement intégrée basée sur des cartes front-end spécifiques construites autour de deux ASICs développés à l'IN2P3 : la puce SAMLONG (2 voies), développée au LAL et au CEA, pour la numérisation des signaux des PMs à haute fréquence et la puce FEAST (54 voies), développée au LPC, pour la mesure de temps des signaux Geiger. La carte front-end calorimètre a été développée au LAL ; elle permet de traiter 16 voies du calorimètre. La carte front-end tracker a été développée à Manchester ; elle permet de traiter 108 voies. L'ensemble des 111 cartes est hébergé dans 6 chassis uniformisés au format VME avec des cartes *backend* et contrôleur développées au LAL. Une carte centrale pour le *trigger*, également développée au LAL, complète le dispositif. L'utilisation massive d'électronique numérique dans les différentes cartes implique également un important travail d'écriture de code *firmware*, sous la responsabilité du LAL, en forte collaboration avec le LPC[43] et Manchester. La conception de la chaîne de traitement analogique/numérique permet de construire une réponse du trigger en moins de 10 μs avec une haute efficacité de collecte des événements de type $\beta\beta$ et des bruits de fond d'intérêt ainsi qu'une forte capacité de réjection des événements fortuits. L'ensemble des cartes ont été produites et testées. L'électronique d'un mur du calorimètre a ainsi été installée au LSM en 2018. La livraison des autres cartes est attendue dans les prochains mois.

3.2.6 Radiopureté

La désintégration $0\nu\beta\beta$ du ^{82}Se est attendue à 3 MeV, dans le domaine en énergie de la radioactivité naturelle, dont les deux principaux radionucléides capables de mimer un événement double bêta sont le bismuth 214 (^{214}Bi , $Q_\beta=3,27$ MeV, descendant de l'uranium 238) et le thallium 208 (^{208}Tl , $Q_\beta=5,00$ MeV, descendant du thorium 232). Ces « polluants » peuvent se trouver en volume dans les matériaux tels que les sources $\beta\beta$ mais aussi venir contaminer l'intérieur du détecteur, notamment le trajectographe, à cause du Radon (^{222}Rn), situé dans la chaîne radioactive de l'uranium 238. Le bruit de fond est ainsi divisé en deux catégories : le bruit de fond interne pour des désintégrations issues directement des feuilles sources et le bruit de fond externe pour des rayonnements externes (e, γ) interagissant avec les feuilles sources. Afin d'atteindre les objectifs de physique de SuperNEMO et démontrer la faisabilité d'une expérience à bruit de fond négligeable, plusieurs niveaux de radiopureté sont requis :

- pour les feuilles sources $\beta\beta$ (bruit de fond interne), un niveau inférieur à 2 $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{208}Tl et 10 $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{214}Bi ,
- pour le radon dans le trajectographe (bruit de fond interne et externe), un niveau inférieur à 0,15 mBq/m^3 (voir section suivante),
- pour l'ensemble des matériaux du détecteur (bruit de fond externe), un niveau de radiopureté bien inférieur à celui des photomultiplicateurs du démonstrateur.

BiPo-3 Le détecteur BiPo-3, conçu et développé par la collaboration SuperNEMO[34, 38, 39], est dédié à la mesure de la radiopureté des feuilles source au niveau de quelques $\mu\text{Bq/kg}$ en ^{208}Tl et en ^{214}Bi . Il est installé au Laboratoire Souterrain de Canfranc en Espagne et opérationnel depuis 2013. La surface totale sensible du détecteur est de 3,6 m^2 . La sensibilité à

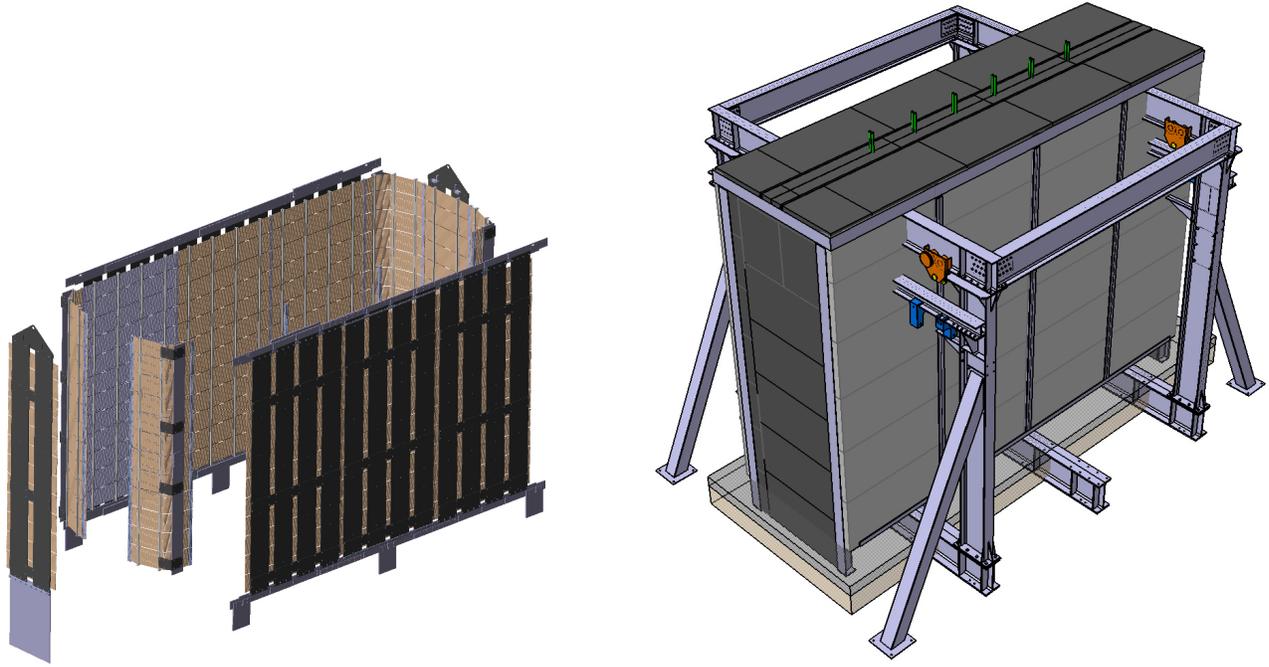


FIGURE 6 – Gauche : Vue éclatée de la bobine magnétique en cuivre et fer pur qui entoure le détecteur. Droite : Vue du blindage en fer et de la structure de soutien du détecteur. Un blindage d'eau à base de cuves en polyéthylène entourera complétement ce blindage en fer.

pu être déterminée grâce aux mesures dédiées de bruit de fond de surface pendant un total de 200 jours. Des limites de $2 \mu\text{Bq/kg}$ (90 % CL) en ^{208}Tl et $140 \mu\text{Bq/kg}$ (90 % CL) en ^{214}Bi ont été extrapolées pour la mesure des feuilles sources de ^{82}Se de densité de 40 mg/cm^2 en 6 mois de mesure. Une description détaillée du détecteur, ses performances et les résultats de mesures des premières feuilles sources est publiée dans [35]. Comme décrit dans la partie 3.2.1, les feuilles sources $\beta\beta$ du démonstrateur SuperNEMO ont été fabriquées à partir de poudres de ^{82}Se purifiés par des techniques différentes et deux techniques de réalisation des feuilles. Le tableau 7 résume les résultats obtenus avec BiPo-3 pour les différents types de feuilles.

Nom	^{82}Se (kg)	Purification	Fabrication	$A(^{208}\text{Tl})(\mu\text{Bq/kg})$	$A(^{214}\text{Bi})(\mu\text{Bq/kg})$
ITEP	1,95	Double distillation	ITEP, Russie	21 ± 10	< 290
Dubna	1,5	Chromatographie inversée	LAPP, France	31 ± 23	< 595
French	0,97	Chromatographie inversée	LAPP, France	< 106	< 1374
Tomsk	1,4	Double distillation	LAPP, France	159 ± 93	< 525

TABLE 7 – Radioactivité des feuilles source $\beta\beta$ du démonstrateur SuperNEMO mesurées avec BiPo-3.

Les feuilles désignées *ITEP* ont pu être mesurées pendant des campagnes relativement longues ce qui a permis d'obtenir la valeur avec les incertitudes les plus petites : $21 \pm 10 \mu\text{Bq/kg}$ en ^{208}Tl et une limite de $290 \mu\text{Bq/kg}$ en ^{214}Bi . Les résultats de mesures des feuilles *Dubna* et *French* sont moins précis mais compatibles avec ceux des feuilles ITEP. En revanche, les feuilles *Tomsk* présentent des niveaux nettement plus élevés.

Une amélioration de la radio-contamination en ^{208}Tl d'un facteur 5 a été obtenue par rapport à NEMO-3. La contamination en ^{214}Bi sera déterminée par le démonstrateur de même que la présence d'éventuels « points chauds » sur les sources.

Spectrométrie gamma pour le bruit de fond externe Plus de 300 échantillons ont été mesurés par spectrométrie gamma bas bruit de fond puis sélectionnés ou rejetés pour entrer dans la composition du démonstrateur de SuperNEMO. Plus de 98 % ont d'ailleurs été mesurés sur l'une des 2 plateformes gérées par l'IN2P3, LSM et PRISNA, avec des sensibilités respectives de l'ordre de l'ordre de $0,5 \text{ mBq/kg}$ et 50 mBq/kg . Les contraintes de radioactivité pour chaque matériau ont été définies par rapport à sa position dans le détecteur, à sa masse totale et à son impact potentiel sur le bruit de fond de l'expérience. D'un point de vue pratique, un matériau a été retenu s'il possédait une activité totale, masse prise en

compte, négligeable devant celle des 712 photomultiplicateurs (PM) pour les radionucléides ^{40}K , ^{238}U , ^{214}Bi (^{226}Ra) et ^{208}Tl (^{232}Th). Pour ce faire, les composants des PM 8 pouces R5912-03 Hamamatsu (bulbe de verre et isolant) ont été mesurés sur 10 lots de production afin de connaître précisément leur niveau d’activité tout au long de la production. Les valeurs moyennes sont présentées ci-dessous en Bq/kg et en Bq/PM.

Composant des PM 8"	Masse (g)	Activité	^{40}K	^{238}U	^{226}Rn	^{232}Th
Bulbe de verre	650	Bq/kg	0,80	0,86	0,47	0,39
Isolant	25	Bq/kg	17,1	2,4	0,50	0,18
		Bq/PM	0,95	0,62	0,32	0,26

TABLE 8 – Bilan de mesures d’activité des composants des PM 8" Hamamatsu.

Le calorimètre du démonstrateur étant composé de 440 PM 8" et de 272 PM 5" Hamamatsu issus de NEMO-3, l’activité totale des 712 PM est de 540, 273, 197 et 124 Bq, respectivement en ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra et ^{232}Th . Un budget de radiopureté a ainsi été réalisé par sous-système (calorimètre, tracker et cadre sources) afin d’être comparé aux activités des PM. Par exemple, l’ensemble des matériaux du calorimètre (fer pur, acier, PMMA, mylar aluminisé, scintillateurs plastique, colles, visseries condensateurs, résistances...), dont la France avait la responsabilité, représente près de 20 tonnes et constitue le sous-système le plus massif et donc critique en termes de radiopureté et de bruit de fond externe. La sélection rigoureuse des matériaux par spectrométrie gamma a permis d’obtenir une activité totale mesurée (en ne prenant pas en compte les limites de détection) représentant au plus une fraction de 8,1 %, 3,0%, 2,7% et 1,7% de l’activité des PM en ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra et ^{232}Th respectivement ce qui est tout à fait remarquable. Le bruit de fond externe sera donc essentiellement dominé par la radioactivité des photomultiplicateurs dans le démonstrateur de SuperNEMO. Sans impact attendu sur la recherche de la désintégration $0\nu\beta\beta$ du ^{82}Se vers l’état fondamental du ^{82}Kr car limité à 2,6 MeV contre $Q_{\beta\beta}=3$ MeV, des simulations précises devront être entreprises pour voir l’impact du bruit de fond externe sur la recherche de la désintégration $0\nu\beta\beta$ et $2\nu\beta\beta$ vers les états excités pour lesquels l’énergie disponible n’est plus que de l’ordre de 1,5 MeV.

3.2.7 Radon

Le ^{222}Rn est l’une des principales sources de bruit de fond pour SuperNEMO comme pour un grand nombre d’expériences s’intéressant à la recherche de phénomènes très rares à basse énergie. Dans le cas de SuperNEMO la concentration de radon dans le gaz du trajectographe doit être inférieure à $150 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$, soit environ 80 atomes de radon par m^3 . Atteindre ce niveau de pureté dans un détecteur de grandes dimensions et de grande complexité mécanique est un véritable challenge.

Nombreuses sont les réalisations entreprises par les membres de SuperNEMO-France pour obtenir un tel niveau de radon.

— Mesures d’émanation :

Tous les matériaux sélectionnés ont été contrôlés par spectrométrie gamma, notamment en ^{226}Ra , noyau père du ^{222}Rn . Toutefois, pour les matériaux critiques au contact du gaz du trajectographe, des mesures spécifiques ont été réalisées afin de contrôler leur niveau d’émanation de Radon. Un dispositif spécifique a été développé et installé au CENBG : il est composé d’une cuve en inox de 700 L pour accueillir des échantillons de grand volume/surface couplée à un détecteur de Radon de type électrostatique. La sensibilité du dispositif dépend de la surface mesurée. Elle atteint par exemple 50 atomes/ m^2 pour un échantillon de 10 m^2 . Certains échantillons ont montré un niveau d’émanation Radon non nul qui pourra être contrebalancé par un renouvellement du gaz du trajectographe en utilisant un débit allant de 0,5 à 2 m^3/h afin de conserver un niveau de radon inférieur à $150 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$.

— Optimisation de la capture du radon :

Nous avons réalisé une étude très complète[41] concernant la capacité d’adsorption du radon dans un grand nombre de matériaux microporeux disponibles sur le marché (charbons actifs, tamis moléculaires, etc) et issus de la recherche en chimie-physique (cages moléculaires, aérogel organique, etc). Cette étude a permis de déterminer la porosité optimale (0,5 à 0,7 nm) ainsi que le rôle de la composition chimique des adsorbants. Ce travail a permis de mieux comprendre le phénomène d’adsorption et de réaliser de dispositifs de capture du radon de manière la plus efficace.

— Réalisation d’un piège à radon pour la caractérisation du trajectographe (J-Trap) :

Comme corollaire du travail d’optimisation de la capture du radon, et afin de déterminer le taux d’émanation global du trajectographe, un piège à radon (J-Trap) a été réalisé au CPPM. Ce dispositif permet d’injecter un gaz (N_2/He) avec une concentration en radon suffisamment faible pour pouvoir vérifier si le taux de radon en sortie du trajectographe est conforme aux contraintes de l’expérience ($< 150 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Les mesures réalisées par nos collègues de l’UCL, en charge du trajectographe, ont montré l’impossibilité d’avoir un gaz porteur d’une pureté suffisante. Le dispositif de capture réalisé est composé par un double piège à charbon actif permettant de réduire le taux de radon

à $20 \pm 12 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ bien en dessous de la concentration requise. Après avoir permis d'effectuer les mesures d'émanation du trajectographe, la J-Trap pourra être utilisée dans les premiers runs de test du démonstrateur.

Concernant le travail à réaliser dans un avenir proche, au sujet de la qualité du gaz, nous sommes fortement impliqués dans le système de recirculation du gaz du trajectographe. Celui-ci, composé de 95 % d'He, 4 % d'éthanol et 1 % d'Ar, doit être réutilisé compte tenu du prix de l'hélium et du flux de gaz prévus (0,5 à 2 m³/h). La nécessité de maintenir le gaz avec une concentration en radon inférieure à 150 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ à l'aide d'un piège anti-radon, exige d'éliminer l'éthanol et d'étudier l'efficacité de ce piège avec un gaz recyclé. Une solution basée sur une technique chromatographique est à l'étude au CPPM.

3.2.8 Software

Une très large fraction du code informatique nécessaire aussi bien pour la simulation des événements SuperNEMO que pour leur reconstruction[45, 42] a été développée au cours des cinq dernières années principalement par des laboratoires de l'IN2P3. La suite logicielle de SuperNEMO s'articule ainsi autour de trois composants :

- **Cadfael** qui permet l'installation et l'utilisation de programmes tiers non développés par la collaboration SuperNEMO tels que le programme Geant4 ou la bibliothèque ROOT,
- **Bayeux**, principalement développé par le LPC Caen[36] est une couche logicielle relativement générique, codée en C++ et qui gère les aspects de flux de données, de géométrie et de définition des matériaux de détecteurs, un moteur de simulation Geant4 et une architecture en *pipeline* de simulation/reconstruction des événements. . .
- **Falaise** développée dans sa grande majorité par le LPC Caen et le LAL correspond enfin au code de modélisation, de simulation et de reconstruction de l'expérience SuperNEMO.

Codée en C++, **Falaise** s'appuie sur les outils mis en œuvre par **Bayeux** afin de proposer un environnement permettant la simulation d'événements d'intérêt pour SuperNEMO (double désintégration beta, bruit de fond de la radioactivité) puis la reconstruction de ces événements au travers d'un ensemble de modules dédiés depuis la clusterisation des cellules Geiger jusqu'à leur interprétation physique en terme de topologie d'événements et de calcul de sensibilité du démonstrateur SuperNEMO. La suite logicielle SuperNEMO a ainsi été enrichie d'outils d'analyse[42] qui permettent aujourd'hui à de nombreux étudiants (plusieurs thèses en cours en France au sein de l'IN2P3) de préparer l'analyse des futures données du démonstrateur.

La phase de R&D sur la résolution en énergie du calorimètre a de plus conduit au développement d'un code de simulation optique[37] qui a permis d'optimiser la réponse des modules optiques du calorimètre[44].

Le système logiciel *online* est réalisé dans le cadre du *Control and Monitoring System* (CMS). Il implémente les fonctionnalités de contrôle et commande à distance de l'instrument, l'acquisition des données, l'automatisation de protocoles de mesure. Il est basé sur trois composants :

- **RabbitMQ** est un système logiciel de communication de niveau et de qualité industrielle (*message broker*).
- **MOS** est un environnement logiciel développé par le LAPP, il s'appuie sur une nouvelle norme technologique nommée OPCUA. Les développements du système MOS sont partagées avec l'expérience CTA.
- **Vire** est un environnement logiciel développé par le LPC pour construire des applications de contrôle et commande sécurisées distribuées en réseau.

De surcroît, la collaboration SuperNEMO s'est rapprochée du groupe AMI (Atlas Metadata Interface) du LPSC afin de bénéficier d'une adaptation du système de base de données de l'expérience ATLAS.

3.3 Répartition des responsabilités par pays

3.3.1 Responsabilités des workpackages

La collaboration compte environ 140 membres avec 50 permanents PhD dont 20 dans les laboratoires de l'IN2P3. La figure 7 présente la liste des *work packages* dans l'expérience SuperNEMO ainsi que les responsabilités françaises.

3.3.2 Responsabilités spécifiques

- *Principal Investigator* : Christine Marquet (CENBG) et David Waters (UCL, UK)
- Responsable scientifique IN2P3 : François Mauger (LPC Caen)
- Responsable technique : Andrea Jérémie (LAPP)

3.3.3 Fonctionnement de l'expérience

- La participation au plan de shifts de l'expérience sera établie selon le nombre de signataires (PhD) dans chaque laboratoire de la collaboration.
- La répartition des coûts de fonctionnement et de démantèlement sera établie selon des critères similaires dans un cadre formel qui sera discuté avec nos partenaires et nos institutions dans les prochains mois.

3.4 Intégration et mise en route

3.4.1 Intégration : étapes passées et à venir

- Premier livrable : BiPo-3

Le détecteur BiPo-3, qui fonctionne au laboratoire souterrain de Canfranc (LSC) Espagne depuis 2013 est un détecteur très basse radioactivité dédié aux mesures de contaminations ultra basses en radionucléides naturels ^{208}Tl (chaîne ^{232}Th) and ^{214}Bi (chaîne ^{238}U) dans des matériaux minces. La surface totale sensible du détecteur est de $3,6\text{ m}^2$. Il a été développé pour mesurer la radiopureté des feuilles source SuperNEMO. Il a permis de valider la radiopureté des éléments constituant les feuilles de SuperNEMO (PVA, Mylar, feuilles source. . .) essentiellement par lots.

- Description de l'intégration des sous-systèmes :

Les éléments du démonstrateur sont arrivés pré-montés au Laboratoire souterrain de Modane. C'est ainsi que les modules de calorimétrie puis du trajectographe ont été livrés les uns après les autres puis en partie assemblés (voir figure 9).

L'ensemble des éléments ont été stockés dans une salle propre en attendant l'installation des feuilles sources et des sources de calibration. Prochainement, l'ensemble des éléments seront associés fermant ainsi le détecteur et ses sources (voir figure 9).

Dès que le détecteur sera câblé à son électronique, le commissioning pourra commencer. La bobine générant le champ magnétique et la tente anti-radon seront alors installés. Pour finir des blindages aux neutrons et aux gammas fermeront l'ensemble permettant ainsi de commencer les prises de données.

Sous-système	Instituts responsables	Date d'intégration
Structure porteuse	IN2P3-Prague	Mars 2015
Calorimètre	IN2P3	Novembre 2016
Tracker	UCL-MSSL	Décembre 2016
Feuilles source	IN2P3-ITEP	Septembre 2018
Bobine	IN2P3	Prévue fin 2018
Tente anti-radon	IN2P3	Prévue début 2019
Blindage	IN2P3-Dubna	Prévue mi-2019

TABLE 9 – Intégration des sous-systèmes de SuperNEMO.

3.4.2 Commissioning prévu

La liste des premières étapes du commissioning technique est :

1. vérification de la continuité de l'ensemble des cables HT et signaux du calorimètre et du trajectographe via l'application d'une tension $\sim 100\text{ V}$ sur chacune des voies,
2. étanchéité à la lumière de chaque module optique,
3. caractérisation du point de fonctionnement des modules optiques (piédestal, gain, taux de déclenchement, bruit, . . .) et des cellules Geiger (plateau Geiger, taux de déclenchement, bruit, . . .),
4. ajustement des tensions pour homogénéiser le point de fonctionnement des éléments de détection, définition des seuils de déclenchement et optimisation des paramètres spécifiques au calorimètre (intégration de la charge) et au trajectographe (marquage en temps des signaux anodiques),
5. suivi en stabilité de la réponse du détecteur.

Une fois ces étapes de contrôles terminées, il sera alors envisageable d'utiliser les sources de calibration afin de reconstruire les trajectoires des électrons dans le trajectographe.

L'étalonnage du détecteur sera effectué avec les 42 sources de ^{207}Bi de faible activité ($\simeq 100$ Bq/source). Des périodes de 15 h de calibration toutes les deux semaines sont planifiées ($< 5\%$ du temps d'exposition). L'étude de la stabilité du gain des PMTs permettra notamment de déterminer le rythme d'utilisation du système de calibration relative avec un système d'éclairage à LED.

Cet étalonnage permettra de qualifier les performances du calorimètre (résolution en énergie et en temps) et du trajectographe (résolution spatiale).

3.5 Calendrier

3.5.1 Planning d'intégration/commissioning/running

La figure 10 montre le calendrier de fin d'intégration du démonstrateur SuperNEMO pour la période de septembre 2018 à mi 2019. A partir du printemps 2019, les premiers runs de commissioning avec le détecteur complet pourront commencer.

3.5.2 Difficultés rencontrées pour expliquer le planning actuel

Difficultés techniques : La séparation du détecteur en sous détecteurs a permis de répartir dans la collaboration les différentes constructions et donc le personnel et le financement. Ceci permet une meilleure organisation au niveau local mais complique la détermination des interfaces et l'intégration du détecteur. Ce design ne permet pas non plus un déploiement progressif d'un détecteur qui pourrait prendre des données avant une construction finale.

La construction a commencé au LSM à l'été 2015 avec l'intégration de la structure et de la tente propre d'intégration. Il a fallu trois ans pour arriver à la fermeture du détecteur interne et il reste encore les protections à intégrer du point de vue de la mécanique.

Nous avons identifiée les difficultés principales rencontrées pour la construction du démonstrateur :

- Avant la construction il a fallu réaliser l'étude mécanique complète de l'ensemble du détecteur répartie principalement entre la France, l'Angleterre et les Etats-Unis en prenant en compte les contraintes techniques et budgétaires, les capacités de construction des différents instituts et les contraintes d'espace au LSM.
- Il a ensuite fallu procéder à la vérification de la radiopureté de tous les matériaux utilisés et de la sélection des méthodes d'usinage afin de préserver cette pureté. Ceci a également nécessité plusieurs fois des modifications du design de l'expérience.
- Les phases de constructions et de test des sous-détecteurs dans les laboratoires ont également pris plus de temps que prévu comme la construction des modules optiques, de production de cellules plus lente, de l'étanchéité des détecteurs de traces...
- Les mêmes équipes de mécaniques étaient impliquées dans la réalisation du design, la construction des éléments du détecteur et de leur construction et installation au LSM. Les rotations de ces différentes personnes et phases ont donc allongé la suite des opérations. Les imprévus se sont également ajoutés à la charge de travail de ces mêmes personnes.
- L'assemblage des sous-détecteurs ensemble au LSM a nécessité des ajustements puisque les objets construits présentaient de légers défauts comme par exemple un « bombage » du mur du calorimètre, la non planéité du support de joints au niveau du détecteur de traces qui a nécessité de refaire l'ensemble des joints.
- L'étanchéité du calorimètre est également un point qui a pris beaucoup de temps au LSM. L'étanchéité radon et hélium du détecteur de traces est assurée par un film nylon posé sur le calorimètre. L'intégration de cette barrière à partir de deux feuilles qu'il fallait rassembler n'a pas permis d'atteindre l'étanchéité requise à l'avant du premier mur du calorimètre. Il a donc fallu procéder à de nombreuses opérations pour améliorer l'étanchéité par l'arrière du mur.
- Les mêmes difficultés d'étanchéités se sont retrouvées aussi au niveau des joints d'interface entre les sous-détecteurs où plus de travail a été nécessaire.
- La fabrication des feuilles source de sélénium a été très difficile compte tenu des précautions extrêmes requises. La mesure de ces sources dans le détecteur BiPo pour valider leur grande radiopureté était également très longue. Malheureusement certaines feuilles ont d'ailleurs été endommagées lors de ces mesures il a donc fallu les refaire.
- Lors des tests finaux du système de déploiement des sources de calibration aux Etats-Unis il s'est avéré que le système ne pourrait pas fonctionner. Il a fallu reprendre le design et la construction de ces éléments ce qui a nécessité pratiquement une année.

Dénomination	Entité	Date
Conseil scientifique	LAL	septembre 2005
Conseil scientifique	CENBG	octobre 2008
Conseil scientifique	IN2P3	mai 2011
Revue technique	IN2P3	décembre 2011
Conseil scientifique	LAPP	janvier 2013
Conseil scientifique	LAPP	septembre 2013
Conseil scientifique	CPPM	juillet 2013
Conseil scientifique	CENBG	février 2014
Conseil Scientifique	LPC Caen	novembre 2016
Conseil scientifique	CENBG	mai 2017
Conseil Scientifique	LPC Caen	mars 2017

TABLE 10 – Conseils et revues dans les unités et à l’IN2P3.

Difficultés de financements : La phase de construction des différents livrables français (calorimètre, structures mécaniques, électronique) a souffert d’importantes difficultés de financement qui ont impacté le calendrier d’intégration du projet de plusieurs années. C’est tout d’abord le démarrage de la production de ces livrables qui a dû être mis en attente de financement, alors même que les autres sous-parties du démonstrateur étaient déjà en cours de fabrication dans les autres pays de la collaboration.

Les budgets finalement attribués et leur échelonnage dans le temps ont également nécessité de reconsidérer certaines options retenues pendant la phase de R&D. Ainsi, le design d’une partie du démonstrateur (calorimètre, structures porteuses, câblage) a dû être revu entraînant des délais importants pour la construction de l’ensemble du projet.

Les difficultés de financement ont également impacté la pérennisation des équipes, en France ou dans le reste de la collaboration, initialement prévues sur la base d’un calendrier plus court, entraînant là-aussi des retards inévitables sur la fabrication puis l’intégration du détecteur.

3.5.3 Définition des échéances à venir

La prise de données pourra commencer dès la fin du commissioning et sans attendre l’intégration des derniers éléments de blindage autour du détecteur : bobine, tente anti-radon et blindages gamma et neutron. Trois phases de prise de données sont prévues, permettant de mettre au point les modèles de bruits de fond et de les valider dans trois différentes configurations de blindages :

- phase 1 : sans bobine, sans tente anti-radon et sans blindage (~ 2 semaines)
- phase 2 : avec bobine et tente anti-radon, sans blindage (~ 2 mois)
- phase 3 : bobine, tente anti-radon et blindage fonctionnels

Le démonstrateur aura le potentiel de vérifier les exigences sur les niveaux des bruits de fond suivants (à 10% dans le cas d’un scénario de niveau nominal) :

- au terme d’une journée pour le radon,
- au terme de 4 mois pour le ^{214}Bi ,
- et au terme de 8 mois pour le ^{208}Tl

3.6 Evaluations et Productions scientifiques passées

3.6.1 Conseils scientifiques d’unité, de l’IN2P3 et revues techniques

Le tableau 10 donne la liste des différents conseils scientifiques et revues d’unité ou de l’IN2P3 au cours desquels l’activité SuperNEMO a été examinée. Les compte-rendus disponibles sont rassemblés en Annexe ??.

3.6.2 Productions scientifiques

La liste des publications de la collaboration NEMO est fournie en annexe A. Elle est accompagnée de la liste des thèses en annexe B.

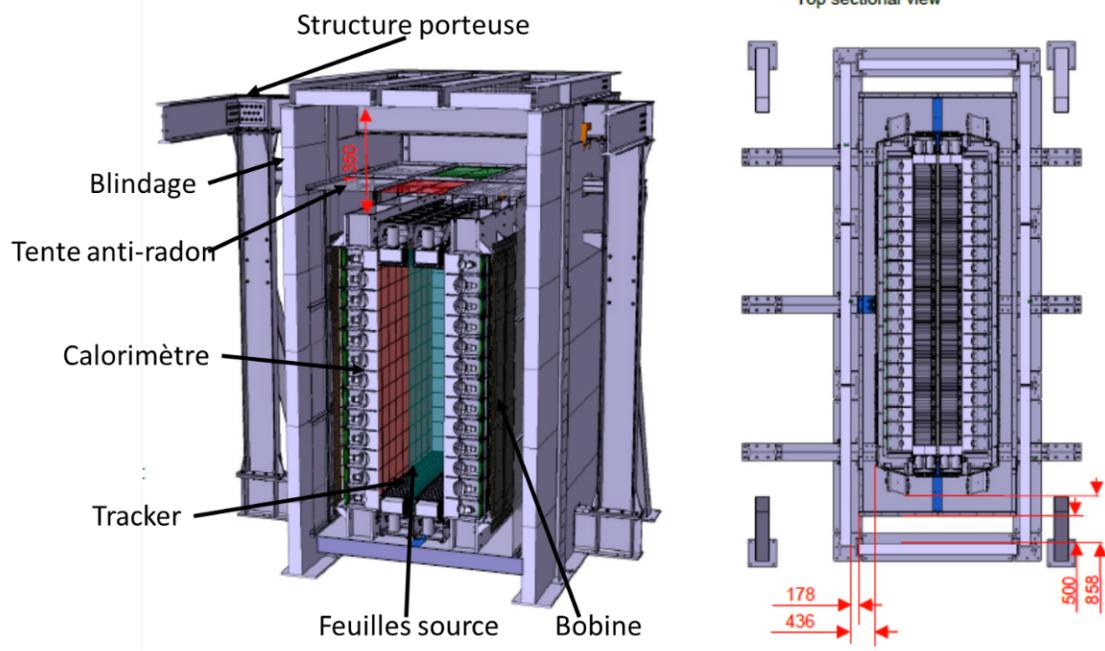


FIGURE 8 – Structure du module démonstrateur SuperNEMO et sous-systèmes.

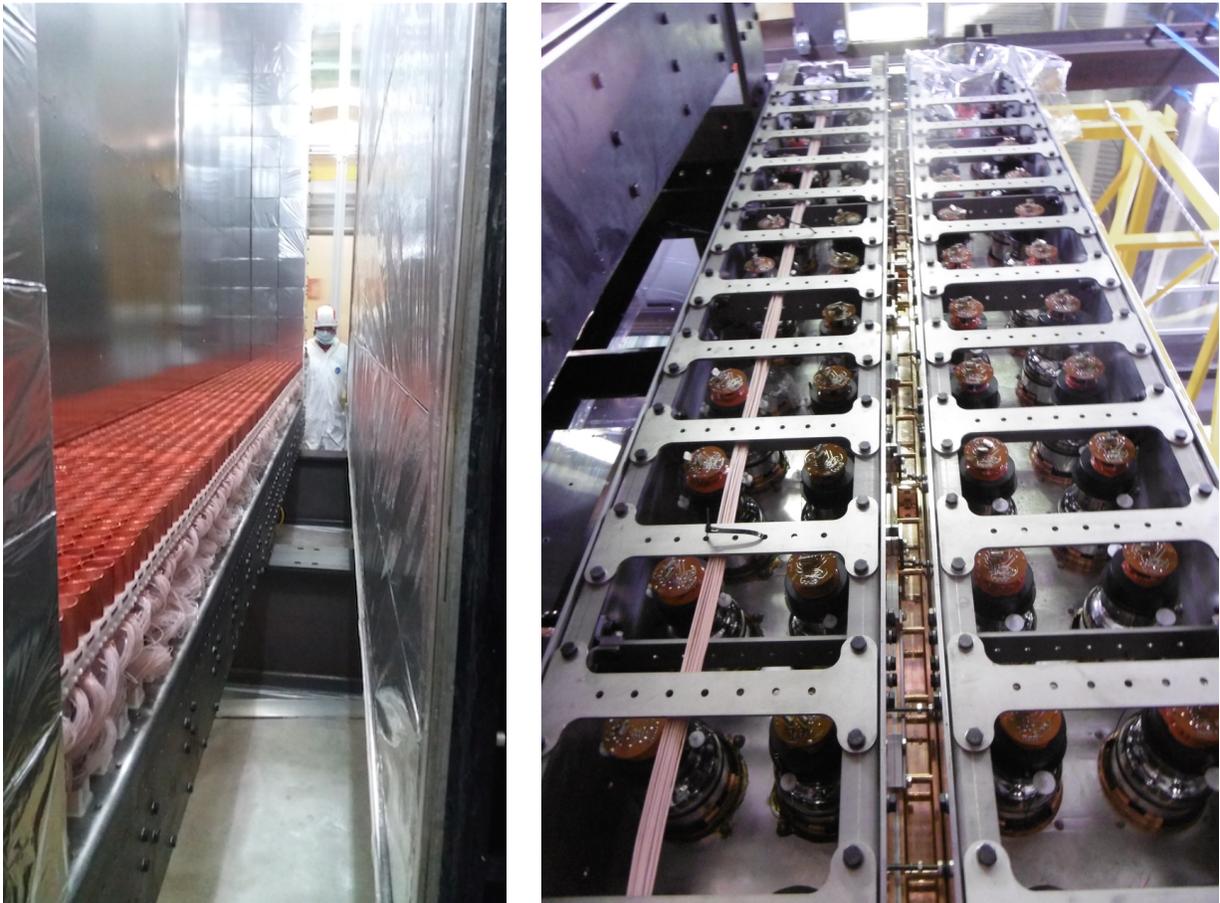


FIGURE 9 – Gauche : Installation d'un mur du calorimètre et d'un module du trajectographe au LSM (fin 2016). Droite : Assemblage des modules du trajectographe autour du cadre source (septembre 2018).

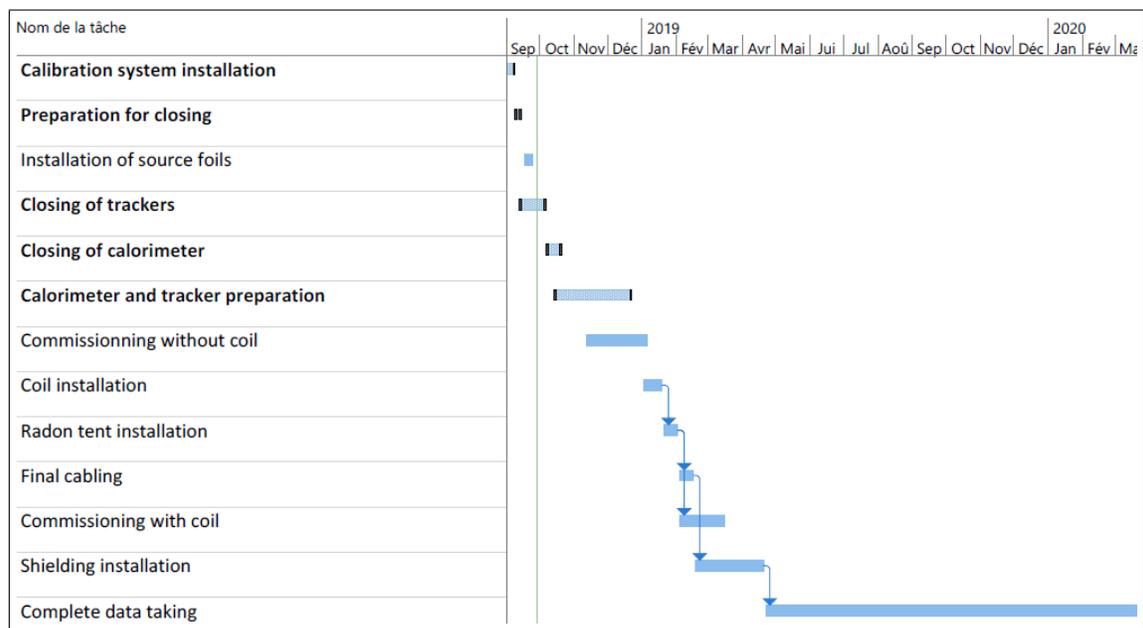


FIGURE 10 – Calendrier de l'intégration/commissioning/running du module démonstrateur SuperNEMO.

4 État de l'art

La table 11 rassemble l'ensemble des expériences en cours ou des projets de la prochaine génération.

Projet	Isotope	Masse kg	$T_{1/2,min}^{0\nu}$ x 10^{27} ans	$m_{\beta\beta}$ meV
GERDA-II*	^{76}Ge	35	0,15	87-180
Majorana-D*	^{76}Ge	30	0,15	87-180
CUPID-0*	^{82}Se	5	0,0024	376-770
SuperNEMO-d*	^{82}Se	6	0,005	260-504
CUPID-Mo*	^{100}Mo	5	0,015	90-170
CUORE*	^{130}Te	200	0,095	53-147
SNO+*	^{130}Te	1300	0,19	44-110
EXO-200*	^{136}Xe	200	0,057	80-204
KamLand-Zen-800*	^{136}Xe	750	0,2	43-110
LEGEND	^{76}Ge	200	1,0	34-70
LEGEND	^{76}Ge	1000	10,0	11-22
SuperNEMO-100	^{82}Se	100	0,049	82-160
CUPID	^{100}Mo	250	2,1	6-14
SNO+	^{130}Te	8000	0,7	23-58
KamLand2-Zen	^{136}Xe	1000	0,6	25-63
nEXO	^{136}Xe	5000	6,0	8-20
NEXT-100	^{136}Xe	100	0,098	60-160
NEXT-2.0	^{136}Xe	1000	1,47	16-40
SuperNEMO-100	^{150}Nd	100	0,081	35-110

TABLE 11 – Sensibilités attendues de rejet du processus $0\nu\beta\beta$ pour les projets de la génération actuelle (indiqués par une étoile *) ou proposés à plus long terme.

La sensibilité des expériences $\beta\beta$ actuelles permet de commencer à sonder des masses effectives du neutrino léger correspondant au scénario de hiérarchie inverse (IH). Le démonstrateur SuperNEMO, avec seulement 6 kg d'isotope, ne peut évidemment pas rivaliser avec ses concurrents. Le projet SuperNEMO, prévu pour accommoder une centaine de kg d'isotope, atteindrait des sensibilités comparables. Cependant, le retard pris par le projet ne permet pas d'espérer un tel retour expérimental avant la fin des années 2020, période à laquelle les projets en développement aujourd'hui devrait avoir sondé la région IH.

Avec une exposition de 100 kg d'isotopes et 5 ans de prises de données, SuperNEMO pourrait observer à 3σ un signal pour une masse effective de $\langle m_{\beta\beta} \rangle \gtrsim 100$ meV. En-deça de cette valeur et dans le cas où la décroissance $0\nu\beta\beta$ se manifesterait pas échange d'un neutrino de Majorana léger (V-A), la technique et le dimensionnement de SuperNEMO ne permettent pas de confirmer une découverte faite par une autre expérience (^{136}Xe , ^{130}Te ...).

Cette comparaison s'appuie toutefois sur des hypothèses de calcul d'éléments de matrice nucléaire qui comportent de grandes incertitudes et de portée relativement réduite : traitement incomplet des états excités dans l'état final et des mécanismes exotiques (V+A), ignorance sur des effets résonants potentiels.

L'approche expérimentale de SuperNEMO demeure aujourd'hui la seule dans le panorama expérimental à bénéficier d'une très performante capacité d'observation et de discrimination de différents processus ou mécanismes de décroissance $\beta\beta$ envisageables dans le contexte de la physique de la violation du nombre leptonique.

5 Ressources et moyens

5.1 Ressources humaines

5.1.1 Organigramme

La collaboration SuperNEMO est organisée selon le schéma suivant :

- un « institutional board »(IB), qui est l’institution principale de la collaboration à laquelle sont soumises l’ensemble des décisions scientifiques, techniques et organisationnelles du projet. l’IB est composé d’un représentant de chaque laboratoire (ou consortium de laboratoires suivant les pays) et est présidé par un membre élu, actuellement Ivan Stekl, de l’Université Technique de Prague.
- deux porte-paroles, élus par l’ensemble des membres de la collaboration, Christine Marquet (CENBG, France) et David Waters (UCL, Royaume-Uni). Ils ont en charge de mettre en place les décisions de l’IB, d’assurer l’animation scientifique de la collaboration et de veiller au respect des calendriers en mettant en adéquation les ressources humaines et financières et les objectifs à atteindre.
- un coordinateur technique, Andréa Jérémie (LAPP, France) préside le conseil technique (« technical board ») qui a pour objectif de discuter et valider les choix techniques du projet. Lors de la phase de prise de données, ce conseil aura également pour but de veiller aux performances des différentes sous-parties du détecteur pour qu’il réponde aux besoins des prises de données et de l’analyse.
- un coordinateur de l’analyse, York Ramachers (Université de Warwick, Royaume Uni) et un coordinateur adjoint, Emmanuel Chauveau (CENBG, France) qui président le conseil d’analyse (« analysis board »). Ce conseil a pour but de fournir et valider les outils de simulation et d’analyse officiels de la collaboration, de répartir les différentes tâches d’analyse et de valider les résultats soumis à l’ensemble de la collaboration.
- un coordinateur de l’intégration qui deviendra coordinateur de la prise de données, Yves Lemièrre (LPC-Caen, France) et un coordinateur adjoint, Alessandro Minotti (LAPP, France) qui ont pour mission actuelle d’organiser l’intégration au LSM des différentes sous-parties du détecteur dans le respect des calendriers du projet et de préparer les phases de « commissioning »et « running »à venir. Ils s’appuient à la fois sur le conseil technique et le conseil d’analyse.

Le président de l’IB, les deux porte-paroles, les trois coordinateurs technique, d’analyse et de « running »ainsi que leurs adjoints, composent le bureau opérationnel de la collaboration.

Trois autres bureaux ont aussi été mis en place pour des missions spécifiques :

- un « speaker »bureau pour gérer les publications et les interventions en conférence, coordonné par Karol Lang (Université du Texas, Etats-Unis) et composé des deux portes-paroles, du président de l’IB, du porte-parole de NEMO-3 (Serge Jullian, LAL, France) et des deux anciens porte-paroles de SuperNEMO (Fabrice Piquemal, CENBG, France et Ruben Saakyan, UCL, Royaume-Uni).
- un « financial board »qui définit les règles de financement des fonds communs pour le fonctionnement de l’expérience. Il sera dirigé par un membre de la collaboration, sa composition est en cours de définition.
- un comité pour la stratégie future du projet qui est coordonné par Laurent Simard (LAL, France) et composé de membres de la collaboration qui, en collaboration avec des théoriciens de la thématique, étudient les différents sujets de Physique à explorer avec la technique SuperNEMO dans sa phase actuelle. Ils évaluent également le potentiel du projet à plus long terme.

L’IN2P3 est donc largement représenté dans l’organisation décisionnelle de la collaboration ainsi que dans les responsabilités de coordination des différentes tâches du projet. L’organigramme actuel de la collaboration est donné figure 11.

5.1.2 Répartition des ressources humaines

Six laboratoires de l’IN2P3 font partie de la collaboration SuperNEMO : le CENBG, le CPPM, le LAL, le LAPP, le LPC-Caen et le LSM. Les figures 12 donnent, pour chaque laboratoire et depuis le début de la construction (2011), l’évolution du personnel impliqué dans le projet. Les noms des personnels permanents impliqués aujourd’hui dans le projet ainsi que leur fraction de temps dédié au projet sont donnés dans le tableau 12.

5.2 Ressources financières

Le coût total du projet ainsi que sa répartition en fonction des différentes sous-parties du détecteur est représenté figure 13. Les contributions des différents instituts financeurs à l’ensemble du projet sont données figure 14. La répartition des ressources financières françaises par sous-parties du détecteur est donnée figure 15.

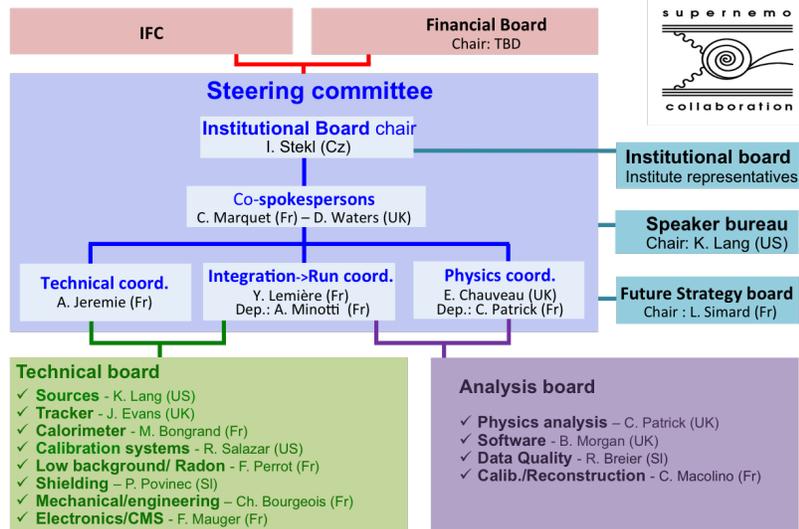


FIGURE 11 – Organigramme de la collaboration SuperNEMO

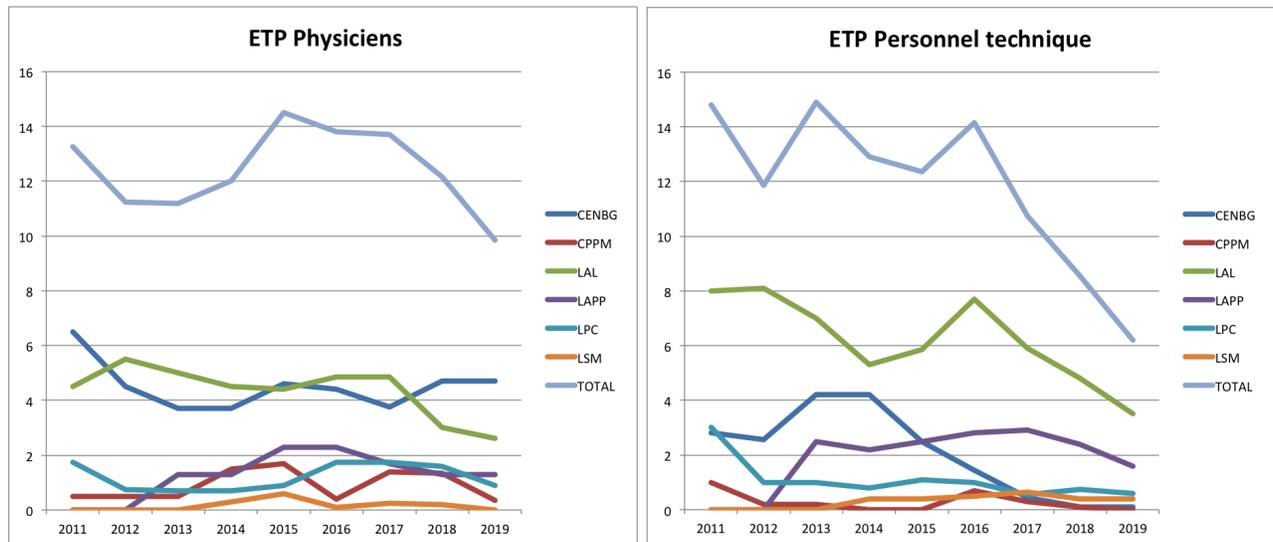


FIGURE 12 – Evolutions des ressources humaines engagées sur le projet SuperNEMO depuis 2011.

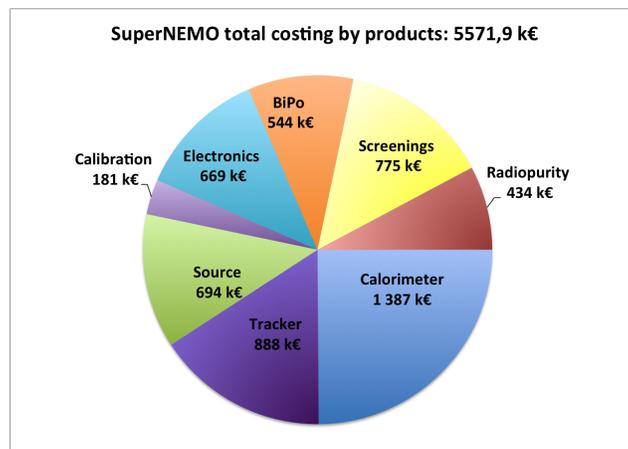


FIGURE 13 – Coût des éléments du démonstrateur SuperNEMO.

Laboratoire	Nom de l'agent	Corps	ETP
CENBG	Cédric Cerna	IR	0,10
CENBG	Emmanuel Chauveau	CR	0,80
CENBG	Christine Marquet	CR	0,80
CENBG	Frédéric Perrot	MC	0,15
CENBG	Fabrice Piquemal	DR	0,05
CENBG	Michael Pravikoff	CR	0,10
CPPM	José Busto	PR	0,35
LAL	Mathieu Bongrand	CR	0,5
LAL	Christian Bourgeois	IR	0,2
LAL	Dominique Breton	IR	0,05
LAL	Matthieu Briere	AI	0,3
LAL	Remy Dorkel	T	0,5
LAL	Xavier Garrido	MC	0,25
LAL	Serge Jullian	DR-Em	0,1
LAL	Bruno Leluan	T	0,5
LAL	Pia Loaiza	IR	0,5
LAL	Jihane Maalmi	IR	0,2
LAL	Carla Macolino	CR	0,2
LAL	Laurent Simard	MC	0,25
LAL	Olivier Duarte	IR	0,05
LAL	Olivier Vitez	T	0,2
LAPP	Dominique Duchesneau	DR	0,30
LAPP	Andréa Jérémie	IR	0,60
LAPP	Eric Chabanne	IR	0,22
LAPP	Thierry Le Flour	IR	0,12
LAPP	Jean-Luc Panazol	IE	0,12
LAPP	Sophie Lieunard	IE	0,60
LPC-Caen	Benoit Guillon	MC	0,05
LPC-Caen	Yves Lemièrre	MC	0,45
LPC-Caen	François Mauger	PR	0,45
LPC-Caen	Jean Hommet	IR	0,30
LPC-Caen	Hugues de Préaumont	IE	0,20
LPC-Caen	Jérôme Poincheval	AI	0,10
LPC-Caen	Philippe Desrues	AI	0,05
LPC-Caen	Bruno Bougard	T	0,05
LPC-Caen	Fabien Noury	T	0,10
LSM	Guillaume Warot	IR	0,1

TABLE 12 – Agents permanents IN2P3 membres actuels de la collaboration SuperNEMO.

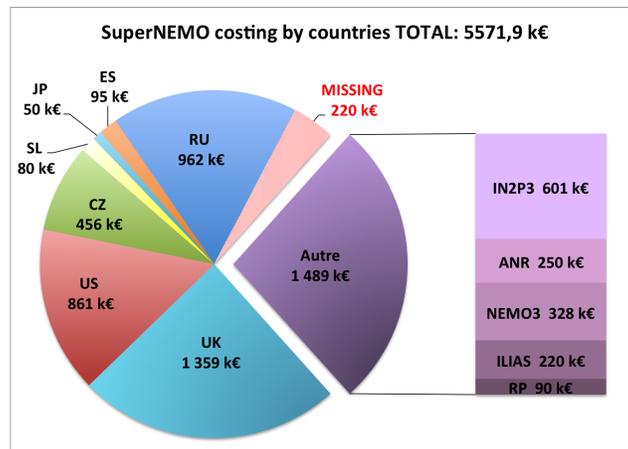


FIGURE 14 – Financement par pays.

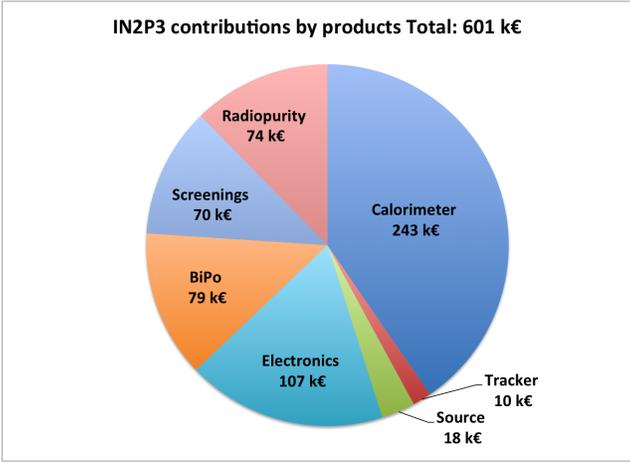


FIGURE 15 – Répartition des ressources financières françaises.

6 Réalisations techniques

Il n'y a plus de réalisations techniques attendues pour SuperNEMO au-delà de la phase de construction qui s'achèvera dans la première moitié de l'année 2019. L'ensemble des outils de caractérisation, de mesure et de construction ont déjà été produits, installés et/ou utilisés : BiPo-3, robot tisseur de la chambre à fils, banc de test calorimétrie, circuits ASIC. . .

7 Auto-analyse SWOT

7.1 Forces

- Force scientifique du projet : excellente capacité d'identification d'un *golden event* (canal $(2e)$), réduction et modélisation des bruits de fond, étude de mécanismes variés (cinématique complète des événements), technologie multi-isotopes ($Q_{\beta\beta} > 2,5$ MeV).
- Expertise basse radioactivité : personnel, équipement (mesure HPGe, radon), LSM.
- Force technique du projet : éléments extrapolables pour la fabrication à plus grande taille : calorimètre à 8 % (industrialisable), tracker 20x2000 cellules (industrialisable), électronique extrapolable à plus grande taille (haute intégration, coût par voie raisonnable).

7.2 Faiblesses

- Limitations de la technique pour l'extrapolation à plus grande échelle ($\mathcal{O}(10$ kg)) : intégration complexe, étanchéité au radon difficile à garantir (interfaces), sélection difficile des matériaux à des taux ultimes (pas de mesure assez sensible pour valider), contaminations ^{208}Tl des feuilles sources sous la barre du $\mu\text{Bq/kg}$,
- Coût de l'expérience : 80 M€ pour une exposition de 500 kg.an et une sensibilité maximale à $0\nu\beta\beta$ vers 10^{26} années vers 2030.
- Moyens financiers endémiquement faibles.
- Manque de moyens humains dans la collaboration pour une phase à 100 kg.

7.3 Opportunités

- Utilisation possible d'une source $\beta\beta$ (^{150}Nd), avec un plus grand espace de phase pour l'état excité et un $Q_{\beta\beta}$ au-delà des principaux bruits de fond (radon, ^{214}Bi).

7.4 Menaces

- L'exposition (masse×temps×efficacité) est trop faible par rapport aux expériences de la nouvelle génération qui ont parfois encore un potentiel d'amélioration de leur bruit de fond dans la prochaine décennie (KAMLAND-Zen, EXO, LEGEND, CUPID. . .).
- Impossible de confirmer un signal $0\nu\beta\beta$ à 3σ qui serait vu dans une des nouvelles expériences leaders (KamLAND, EXO. . .).
- Expérience de grande taille au delà de 10 kg : problème du site d'accueil souterrain (bien que moins sensibles aux cosmogéniques par rapport à d'autres expériences calorimétriques : Ge, bolomètres).

Références

- [1] col., Neutrino 2018 Poster (2008).
- [2] GERDA col., Neutrino2018 conference (2018)
- [3] CUPID-0 col., arXiv :1802.07791v3 (2018)
- [4] NEMO3 col., Nucl. Phys. A847, 168 (2010)
- [5] NEMO3 col., Phys. Rev. D92, 072011 (2015)
- [6] Aurora experiment, arXiv :1601.05578 (2016)
- [7] CUORE col., Phys. Rev. Lett. 120 132501 (2018)
- [8] EXO-200 col., Phys. Rev. Lett. 120, 072701 (2018)
- [9] KamLand-Zen col., Phys. Rev. Lett. 117, 082503 (2016)
- [10] NEMO3 col., Phys. Rev. D 94, 072003 (2016)
- [11] J. Kotila, F. Iachello, Phys. Rev. C85 (2012) 034316
- [12] J. Menéndez et al., Nucl. Phys. A818 (2009) 139
- [13] Y. Iwata et al., Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 112502
- [14] J. Barea et al., Phys. Rev. C 91 (2015) 034304
- [15] J. Hyvärinen et al., Phys. Rev. C 87 (2015) 024613
- [16] F. Simkovic et al., Phys. Rev. C 87 (2013) 045501
- [17] N. Lopez Vaquero et al., Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 142501
- [18] J. Yao et al., Phys. Rev. C 91 (2015) 024316
- [19] P. K. Rath et al., Phys. Rev. C 82 (2010) 064310
- [20] D. L. Fang et al., Phys. Rev. C 83 (2011) 034320
- [21] KamLAND-Zen col., Phys. Rev. C 86, 021601 (2012)
- [22] NEMO3 col., Neutrino2018 Poster (2018)
- [23] NEMO3 col., Phys. Rev. Lett. 119, 041801 (2017)
- [24] A. Barabash, arXiv :1803.06894v1 (2018)
- [25] *Beyond NEMO-3*, collaboration NEMO, rapport interne (2004)
- [26] *Results of the NEMO-3 experiment and the SuperNEMO proposal*
Lepton number violation and neutrinoless double beta decay,
Searching for lepton number violation with the SuperNEMO experiment, Proposal for the participation of France in
the construction of a preproduction prototype (demonstrator module) of the SuperNEMO double beta decay detector,
the SuperNEMO Collaboration – France (2011)
- [27] R. Arnold et al (NEMO-3 collaboration), *Results of the search for neutrinoless double- β decay in ^{100}Mo with the*
NEMO-3 experiment, Phys. Rev. D 92 (2015) 072011
- [28] TDR SuperNEMO, 2011.
- [29] H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al, *Evidence for Neutrinoless Double Beta Decay*, Mod.Phys.Lett.A16 :2409-2420,2001.
- [30] M. Agostini et al, *Improved limit on neutrinoless double beta decay of ^{76}Ge from GERDA Phase II*, Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 132503
- [31] KamLAND-Zen Collaboration, *Search for Majorana Neutrinos near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen*, Phys. Rev. Lett. 117, 082503 (2016)
- [32] F. Simkovic et al, *Improved description of the $2\nu\beta\beta$ -decay and a possibility to determine the effective axial-vector coupling constant*, Phys. Rev. C 97, 034315 (13 Mar 2018)
- [33] SuperNEMO Collab., , Nucl. Inst. Meth. A 868, 98-108 (2017)
- [34] SuperNEMO Collaboration, Nucl. Inst. Math A 621, 120-128 (2010)
- [35] SuperNEMO Collaboration, J. Instrum. 12 (2017) P06002
- [36] F.Mauger, *The Bayeux library and the SuperNEMO software*, GDR neutrino, juin 2014
- [37] Nucl. Inst. Meth A 625, 20-28 (2011)
- [38] Mathieu Bongrand, *Mesure des processus de double désintégration bêta du ^{130}Te dans l'expérience NEMO-3. R&D du projet SuperNEMO : étude d'un détecteur BiPo*, Université Paris-Sud (2008)

- [39] Arnaud Chapon, *Mesure des processus de double désintégration bêta du ^{100}Mo vers l'état excité $0+$ du ^{100}Ru dans l'expérience NEMO-3 pour la mesure de très faibles contaminations de feuilles sources*, Université de Caen Normandie, 2011
- [40] Emmanuel Chauveau, *Développement de compteurs à scintillation haute performance et très bas bruit de fond pour le calorimètre de SuperNEMO*, Université de Bordeaux, 2010
- [41] Raymond Noel, *Étude et développement de substrats microporeux pour l'adsorption du radon et son application en physique du neutrino*, Université d'Aix-Marseille, 2015
- [42] Steven Calvez, *Development of reconstruction tools and sensitivity of the SuperNEMO demonstrator*, Université Paris-Saclay, 2017. English. <NNT : 2017SACLS285> <tel-01632815>
- [43] Guillaume Oliviero, *Expérience SuperNEMO pour la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos : conception et réalisation du système de déclenchement du module démonstrateur*, Université de Caen Normandie, 2018 (en préparation)
- [44] Arnaud Huber, *Recherche de la nature du neutrino avec le détecteur SuperNEMO : simulations optiques pour l'optimisation du calorimètre et performances attendues pour le ^{82}Se* , Université de Bordeaux, 2017
- [45] Christophe Hugo, *Analyse des données de l'expérience NEMO-3 pour la recherche de la désintégration double bêta sans émission de neutrinos. Étude des biais systématiques du calorimètre et développements d'outils d'analyse*, Université Paris-Sud (2012)

Annexes

A Liste de publications NEMO-3/SuperNEMO

A.1 Revues à comité de lecture

— 2001

1. Chemical purification of molybdenum samples for the NEMO 3 experiment. R. Arnold et al. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 474 (2001) 93-100
2. Influence of neutrons and gamma-rays in the Fréjus underground laboratory on the NEMO experiment. Ch. Marquet et al., NEMO Collaboration. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 457 (2001) 487-498

— 2002

1. Gamma-ray flux in the Fréjus underground laboratory measured with NaI detector. H. Ohsumi et al, NEMO Collaboration. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 482 (2002) 832-939

— 2003

1. Possible background reduction in double beta decay experiments, R. Arnold et al., Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A 503 (2003) 649-657

— 2004

1. Study of 2b-decay of Mo-100 and Se-82 using the nemo3 detector, R. Arnold et al., JETP Lett. 80 (2004) 377-381

— 2005

1. First results of the search for neutrinoless double-beta decay with the NEMO3 detector, R. Arnold et al., Phys.Rev.Lett.95(2005)182302
2. Technical design and performance of the NEMO3 detector, R. Arnold et al., Nucl. Inst. Meth. A536 (2005) 79-122

— 2006

1. Limits on different Majoron decay modes of ^{100}Mo and ^{82}Se for neutrinoless double beta decays in the NEMO-3 experiment, R. Arnold et al., Nucl. Phys. A765 (2006) 483-494

— 2007

1. Measurement of double beta decay of ^{100}Mo to excited states in the NEMO3 experiment, R. Arnold et al., Nucl. Phys. A781 (2007) 209-226

— 2009

1. Measurement of the background in the NEMO 3 double beta decay experiment, J. Argyriades et al., Nucl. Inst. Meth. A606 (2009) 449-465

2. Measurement of the double beta decay half-life of ^{150}Nd and search for neutrinoless decay modes with the NEMO-3 detector, J. Argyriades et al., Phys. Rev. C80 (2009), 032501
- 2010
1. Probing New Physics Models of Neutrinoless Double Beta Decay with SuperNEMO. R. Arnold et al, SuperNEMO Collaboration. European Physical Journal C 70 (2010) 927-943
 2. Measurement of the two neutrino double beta half-life of Zr-96 with the NEMO-3 detector, J. Argyriades et al., Nucl. Phys.A847(2010)3-4168-179
 3. Results of the BiPo-1 prototype for radiopurity measurements for the SuperNEMO double beta source foils, J. Argyriades et al., Nucl. Inst. Meth. A622 (2010) 120-128
- 2011
1. Measurement of the $\text{bb}2\text{n}$ decay half-life of ^{130}Te with the NEMO-3 detector, R. Arnold et al (NEMO-3 Collaboration), Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 062504
 2. Spectral modeling of scintillator for the NEMO-3 and SuperNEMO detectors, J. Argyriades et al., Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A 625 (2011) 20-28
 3. Probing new physics models of neutrinoless double beta decay with SuperNEMO, R. Arnold et al., Eur. Phys. J C70 (2010) 927-943
- 2014
1. Search for neutrinoless double-beta decay of ^{100}Mo with the NEMO-3 detector, R. Arnold et al., NEMO-3 Collaboration, Phys. Rev. D 89 (2014) 111101
 2. Investigation of double beta decay of ^{100}Mo to excited states of ^{100}Ru , R. Arnold et al., NEMO-3 Collaboration, Nucl. Phys. A 925 (2014) 25-36
- 2015
1. Result of the search for neutrinoless double- β decay in ^{100}Mo with the NEMO-3 experiment, Arnold, R. et al., NEMO-3 Collaboration, Phys. Rev. D 92 (2015) 072011
- 2016
1. Measurement of the double-beta decay half-life and search for the neutrinoless double-beta decay of ^{48}Ca with the NEMO-3 detector, R. Arnold et al., NEMO-3 Collaboration, Phys. Rev. D 93 (2016) 112008
 2. Measurement of the $2\nu\beta\beta$ decay half-life of ^{150}Nd and a search for $0\nu\beta\beta$ decay processes with the full exposure from the NEMO-3 detector, R. Arnold et al., NEMO-3 Collaboration, Phys. Rev. D 94 (2016) 072003
- 2017
1. Measurement of the $2\nu\beta\beta$ Decay Half-Life and Search for the $0\nu\beta\beta$ Decay of ^{116}Cd with the NEMO-3 Detector, R. Arnold et al., NEMO-3 Collaboration, Phys. Rev. D 95 (2017) 012007
 2. Search for neutrinoless quadruple- β decay of ^{150}Nd with the NEMO-3 detector, R. Arnold et al., NEMO-3 Collaboration, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 041801
 3. The BiPo-3 detector for the measurement of ultra low natural radioactivities of thin materials, A. S. Barabash et al., SuperNEMO Collaboration, J. Instrum. 12 (2017) P06002
 4. Calorimeter development for the SuperNEMO double beta decay experiment, A. S. Barabash et al., SuperNEMO Collaboration, Nucl. Instrum. Meth. A 868 (2017) 98-108
 5. Development of the ultra-low background HPGe spectrometer OBELIX at Modane underground laboratory. V. B. Brudanin et al. JINST 12, P02004 (2017).
- 2018
1. Final results on ^{82}Se double beta decay to the ground state of ^{82}Kr from the NEMO-3 experiment. R. Arnold et al, NEMO-3 Collaboration (2018).

A.2 Actes de conférences

1. Search for neutrinoless double beta-decay – NEMO3 and SuperNEMO. Ch. Marquet. In PoS - Proceedings of Science - 35th International Conference On High Energy Physics (ICHEP2010), France (2010) 307
2. Reactor neutrinos, double beta and beta decays experimental review. F. Piquemal. In PoS - Proceedings of Science - 35th International Conference On High Energy Physics (ICHEP2010), France (2010) 553
3. The NEMO-3 results after completion of data taking. L. Simard, NEMO-3 Collaboration. 12th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2011). Journal of Physics : Conference Series 375 (2012) 042011

4. The NEMO-3 Experiment. R.B. Pahlka, NEMO-3 Collaboration. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 229-232 (2012) 491
5. Review of Double Beta Decay Experiments, L. Simard, Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics), p.140-146
6. Latest results of NEMO-3 experiment and present status of SuperNEMO, H. Gómez, 37th International Conference on High Energy Physics, Valencia, Spain, 2-9 Jul 2014
7. Radiopurity requirements for the SuperNEMO experiment and the BiPo detector, G. Eurin, Topical Research Meeting on Prospects in Neutrino Physics, London, indéfini, 19-20 Dec 2013
8. NEMO-3 analysis of the double- β decay of ^{96}Zr , G. Eurin, NEMO-3 Collaboration, 50th Rencontres de Moriond on EW Interactions and Unified Theories, 14-21 Mar 2015. La Thuile, Italy
9. Latest NEMO-3 Results and Status of SuperNEMO, M. Bongrand, 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, Asilomar, 8-13 Sep 2013, Physics Procedia, 2015
10. Search for $0\nu 2\beta$ of ^{100}Mo by NEMO-3 and status of SuperNEMO, M. Bongrand, 26th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Boston, United States, 2-7 Jun 2014, AIP Con. Proc. 1666, 170002 (2015)
11. Investigations of 2β decay of ^{106}Cd and ^{58}Ni with HPGe spectrometer OBELIX. E. Rukhadze, P. Loaiza et al, AIP Conf. Proc. 1672, 130005 (2015)
12. Obelix, a new low-background HPGe at Modane Underground Laboratory. P. Loaiza, et al. AIP Conf. Proc. 1672, 130002 (2015)
13. Latest results of NEMO-3 experiment and present status of SuperNEMO, H. Gomez, NEMO-3 Collaboration and SuperNEMO Collaboration, Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 1765-1770
14. The SuperNemo bb0n enriched ^{82}Se source foils and their radiopurity measurement with the BiPo-3 detector. P. Loaiza and SuperNEMO collaboration. J. Phys. Conf. Ser. 888 012086 (2017)
15. $0\nu\beta\beta$ sensitivity with the SuperNEMO demonstrator, S. Calvez, 52nd Rencontres de Moriond EW 2017

Proceeding de conférences :

1. Gamma-tracking and sensitivity to gamma-emitting backgrounds in SuperNEMO, S. Calvez et al., SuperNEMO Collaboration, PoS 2016 (2017) 1025
2. The BiPo-3 detector, P. Loaiza et al., Appl. Radiat. Isot. 123 (2017) 54-59

B Thèses

— LAL

1. Mesure des processus de double désintégration bêta du ^{130}Te dans l'expérience NEMO-3. R&D du projet SuperNEMO : étude d'un détecteur BiPo.
Mathieu Bongrand (4/9/2008) (Université Paris-Sud)
2. Optimisation du blindage contre les neutrons pour le démonstrateur de SuperNEMO et analyse de la double désintégration bêta du Néodyme-150 vers les états excités du Samarium-150 avec le détecteur NEMO-3.
Sophie Blondel (28/06/2013) (Université Paris Sud)
3. Search for the double-beta decay of ^{96}Zr with the NEMO-3 detector and ultra-low radioactivity measurements for the SuperNEMO experiment using the BiPo-3 detector.
Guillaume Eurin (12/10/2015) (University College London)
4. Development of reconstruction tools and sensitivity of the SuperNEMO demonstrator.
Steven Calvez (21/09/2017) (Université Paris-Sud)
5. Neutrino physics with SoLid and SuperNEMO experiments.
Delphine Bourssette (13/09/2018) (Université Paris-Sud)

— CENBG

1. Expérience NEMO-3 : Étude de la stabilité des étalonnages en énergie et en temps du calorimètre : Mesure de la contribution des neutrons au bruit de fond de la double désintégration bêta sans émission de neutrino.
Cécile Jollet (2002)
2. Étude du système d'étalonnage relatif du calorimètre du détecteur NEMO-3 et recherche des périodes de décroissances $0\nu\beta\beta$ et $2\nu\beta\beta$ du ^{100}Mo .
Guillaume Lutter (2006)

3. Recherche de la double décroissance bêta sans émission de neutrino du ^{82}Se . Analyse des données et modélisation du bruit de fond du détecteur NEMO-3.
Gwenaëlle Broudin (2007)
4. Développement de compteurs à scintillation hautes performances et de très basse radioactivité pour le calorimètre du projet SuperNEMO.
Emmanuel Chauveau (18/11/2010) (Université Bordeaux 1)
5. Analyse des données de l'expérience NEMO-3 pour la recherche de la désintégration double bêta sans émission de neutrinos. Étude des biais systématiques du calorimètre et développements d'outils d'analyse.
Christophe Hugon (29/11/2012) (Université Paris-Sud)
6. Recherche des désintégrations double bêta avec et sans émission de neutrinos du ^{82}Se vers les états excités du ^{82}Kr dans l'expérience NEMO-3 : développement de dispositifs de mesures ultra-sensibles d'émanation du Radon pour l'expérience SuperNEMO.
Benjamin Soulé (2/12/2015) (Université de Bordeaux)
7. Recherche de la nature du neutrino avec le détecteur SuperNEMO : simulations optiques pour l'optimisation du calorimètre et performances attendues pour le ^{82}Se .
Arnaud Huber (29/9/2017) (Université de Bordeaux)
8. Recherche de décroissance double bêta sans émission de neutrinos avec le démonstrateur SuperNEMO.
Miroslav Macko (décembre 2018)
9. Expérience SuperNEMO : détermination de la nature du neutrino à travers la recherche de la décroissance double bêta du ^{82}Se – Mise au point des méthodes et caractérisation du calorimètre.
Ramon Salazar (en préparation depuis le 19/11/2017)
10. Expérience SuperNEMO : détermination de la nature du neutrino à travers la recherche de la décroissance double bêta du ^{82}Se – Caractérisation et optimisation du calorimètre.
Axel Pin (en préparation depuis le 28/9/2017)

— LPC Caen

1. Recherche de la violation de conservation du nombre leptonique total par le processus de double désintégration bêta du ^{82}Se et du ^{150}Nd dans l'expérience NEMO-3. Étude du processus Bi-Po de la chaîne du thoron
Yves Lemièrre (26/9/2008) (Université de Caen/Basse Normandie)
2. Mesure des processus de double désintégration bêta du ^{100}Mo vers l'état excité $0+$ du ^{100}Ru dans l'expérience NEMO-3 pour la mesure de très faibles contaminations de feuilles sources
Arnaud Chapon (10/10/2011) (Université de Caen/Basse Normandie)
3. Expérience SuperNEMO pour la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos : conception et réalisation du système de déclenchement du module démonstrateur.
Guillaume Oliviero (en préparation depuis le 14/9/2015)

— LAPP

1. Étude de bruit de fond et optimisation du design du module démonstrateur de SuperNEMO. Recherche des désintégrations $2\nu\beta\beta$ et $0\nu\beta\beta$ du Cd-116 vers les états excités du Sn-116 avec NEMO-3.
Thibaut le Noblet (26/09/2017) (Université Grenoble Alpes)

— PARIS 11 en cotutelle avec České vysoké učení technické (Prague) :

1. Mesure de la double désintégration bêta avec émission de deux neutrinos du Mo-100 vers l'état excité $0+(1)$ dans l'expérience NEMO-3.
Ladislav Vála (2003)
2. Méthode d'analyse pour la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrinos dans l'expérience NEMO-3 : étude du bruit de fond et premiers résultats.
Anne-Isabelle Etienvre (2003)

— PARIS 7

1. Étude du détecteur de traces de l'expérience NEMO-3 – simulation de la mesure de l'ultra-faible radioactivité en ^{208}Tl des sources de l'expérience NEMO-3 candidates à la double désintégration bêta sans émission de neutrino.
Karim Errahmane (2001)

— SACLAY

1. Recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrino du ^{82}Se avec le démonstrateur SuperNEMO.
Cloé Girard (en préparation depuis le 30/09/2017)

C Laboratoires et instituts de la collaboration SuperNEMO

La collaboration comprend environ 140 physiciens et ingénieurs répartis dans 9 pays et 22 laboratoires et instituts. Les laboratoires IN2P3 sont indiqués en italique.

- *Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan, Bordeaux (France)*
- *Centre de Physique des Particules de Marseille, Marseille (France)*
- Charles University, Prague (République Tchèque)
- Comenius University, Bratislava (Slovaquie)
- Czech Technical University in Prague, Prague (République Tchèque)
- Idaho National Laboratory, Idaho Falls (USA)
- Imperial College London, Londres (Angleterre)
- Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscou (Russie)
- Joint Institute for Nuclear Research, Dubna (Russie)
- *Laboratoire Souterrain de Modane, Modane (France)*
- *Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen, Caen (France)*
- *Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay (France)*
- *Laboratoire d'Annecy le Vieux de Physique des Particules, Annecy (France)*
- Institute for Nuclear Research, Kiev (Ukraine)
- Osaka University, Osaka (Japon)
- Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava (Slovaquie)
- University of Manchester, Manchester (Angleterre)
- University of Texas, Austin (USA)
- University College London, Londres (Angleterre)
- University of Jyväskylä, Jyväskylä (Finlande)
- University of Warwick, Warwick (Angleterre)
- Wakasa Wan Energy Research Center, Fukui (Japon)

D Rapports de conseils scientifiques

- CENBG, octobre 2008 :
Relevé de conclusions du conseil scientifique (voir documents joints)
- IN2P3, décembre 2011 :
Rapport de revue IN2P3 du projet SuperNEMO (voir documents joints).
- IN2P3, juin 2012 :
Conseil Scientifique de l'IN2P3 Relevé de conclusions (voir documents joints).
- LAPP, janvier 2013 :
Relevé de conclusion :
Le Conseil Scientifique du LAPP a approuvé la stratégie du groupe neutrino pour continuer dans la thématique neutrinos et poursuivre les projets à court terme proposés dont SuperNEMO.
- LAPP, juillet 2013 :
Relevé de conclusion :
Le Conseil Scientifique du LAPP a revu en détail les projets neutrinos du LAPP. Il a félicité le groupe pour les avancées dans les implications entre autre dans SuperNEMO.
- CENBG, février 2014 : Compte-rendu du conseil scientifique (voir documents joints).