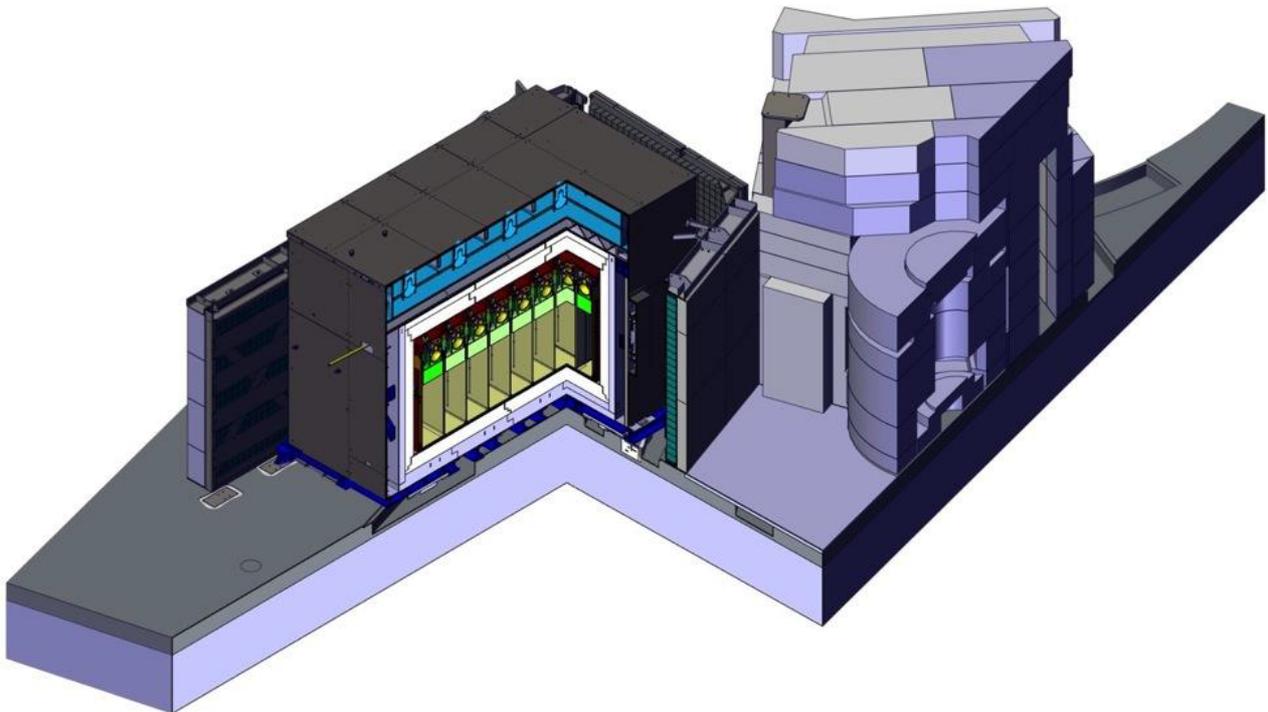




STEREO

Recherche de neutrinos stériles auprès du réacteur de l'ILL

Document pour le Conseil Scientifique de l'IN2P3 des 28 et 29 juin 2018



1. RESUME DU MEMOIRE

En 2011 une ré-analyse de la prédiction des flux émis [1,2] et de l'ensemble des flux mesurés à courte distance des réacteurs (≤ 1 km) [3] a mis en évidence un déficit de neutrinos mesurés. Une interprétation possible est l'existence d'un nouveau type de neutrino au-delà des trois déjà connus. Il ne pourrait pas interagir directement avec la matière, il est dit « stérile », cependant il participerait de la même façon que les autres neutrinos au phénomène d'oscillation : au cours de leur propagation les différents types de neutrino se mélangent. La fraction du mélange vers l'état stérile serait alors responsable du déficit observé. Le but de l'expérience STEREO est d'aller au-delà de la simple mesure du déficit, et de tester si une nouvelle oscillation existe dans les premiers 10 m de parcours des antineutrinos émis par le réacteur de recherche de l'ILL à Grenoble, à une distance sensible à une distorsion du spectre en énergie. La signature recherchée est une distorsion sinusoïdale du spectre en énergie qui évoluerait avec la distance au cœur. Le détecteur STEREO est ainsi segmenté en six cellules couvrant une distance de 2.4 m permettant de tester la gamme de longueur d'oscillation pointée par les données existantes. La technologie de détection emploie des liquides scintillants dopés au Gadolinium (Gd), avec un volume cible total d'environ 1.8 m³. Cette technologie, déjà largement utilisée et bien maîtrisée, permet d'atteindre une bonne précision de mesure grâce à un contrôle précis de la réponse en énergie et un pouvoir discriminant sur la nature des particules détectées. Ce dernier point est exploité pour soustraire le bruit de fond résiduel à l'intérieur des blindages de STEREO.

Depuis fin 2016, près de 400 neutrinos par jour sont détectés quand le réacteur fonctionne à sa pleine puissance de 57 MW. Les bruits de fond induits par le réacteur sont efficacement atténués par les blindages, et plusieurs périodes d'arrêt du réacteur ont permis d'étudier en détails le bruit de fond résiduel induit par les rayons cosmiques. Les premiers résultats présentés en conférence en mars 2018 cumulent 66 jours à 57 MW. Ils excluent une partie significative de l'espace des paramètres attendu de l'hypothétique 4^e neutrino et rejette à 98,8% le meilleur ajustement de ce que l'on nomme l'anomalie des neutrinos de réacteur ($\Delta m^2_{\text{new}} = 2.3$; $\sin^2(2\vartheta_{\text{new}}) = 0.17$) [3].

2. ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Les expériences d'oscillation des neutrinos de ces deux dernières décennies ont mesuré avec précision les angles de mélange et la répartition des masses des neutrinos dans un cadre à trois saveurs. Dans ce modèle à trois neutrinos, aucune disparition significative n'est attendue pour des neutrinos de quelques MeV et des distances de moins de 100 m. Néanmoins de nombreuses expériences réalisées à proximité des réacteurs nucléaires observent un flux d'antineutrinos électroniques plus faible que celui attendu à de telles distances. Ces observations font suite à des articles publiés en 2011 [1,2] dans lequel les prédictions des spectres d'antineutrino émis par les réacteurs ont été réévaluées, conduisant à une augmentation de quelques pourcents du flux prédit. Le taux d'interaction de neutrinos attendu a également été mis à jour pour 19 mesures effectuées à courte distance (10-100 m) de réacteurs. Le résultat est un déficit moyen de 6,5% des neutrinos détectés par rapport aux nouvelles prédictions, c'est ce qu'on appelle l'anomalie des neutrinos de réacteur (RAA) [3]. Les résultats récents des expériences Double Chooz [4, 5], Daya Bay [6] et RENO [7] sont venus confirmer avec une grande précision ce déficit pour des distances au réacteur d'environ 500 m.

Essentiellement, deux explications sont possibles pour rendre compte de ces observations : la première consiste en une sous-estimation ou un traitement incomplet des incertitudes

systématiques dans le modèle de prédiction du flux d'antineutrino émis [8, 9], tandis que la seconde propose une interprétation faisant intervenir de la physique au delà du Modèle Standard. Dans cette seconde interprétation, le déficit observé à courte distance est interprété, par analogie avec les déficits connus de neutrinos induits par les oscillations dans les secteurs solaire et atmosphérique, par une oscillation vers un nouvel état du neutrino, dit stérile. Cette dernière explication pourrait également expliquer une autre anomalie (connue de longue date et dite anomalie gallium), dans laquelle les flux de neutrinos émis par des sources bêta intenses et mesurés auprès des détecteurs de neutrinos solaires sont plus faibles que ceux attendus, ainsi qu'une partie des résultats anormaux observés dans les expériences auprès des accélérateurs.

Les nombreux résultats expérimentaux réalisés dans différents canaux contraignent fortement les paramètres d'oscillations vers un état stérile du neutrino et rendent difficile une interprétation de l'ensemble des anomalies observées par la seule existence d'un neutrino stérile. En particulier, dans le secteur des neutrinos muoniques, les expériences d'apparition (LSND et MiniBooNE) et de disparition (MINOS/MINOS+ et IceCube) semblent donner des résultats incompatibles [9, 10].

D'autres contraintes, complètement indépendantes, sont par ailleurs apportées par la cosmologie, et en particulier par le nombre d'espèces de neutrinos relativistes N_{eff} présentes lors de la nucléosynthèse primordiale (BBN) et durant l'époque de recombinaison. Les données issues du fond diffus cosmologique et de formation des grandes structures défavorisent l'existence d'une espèce supplémentaire de neutrino avec une masse supérieure à 0.3 eV. Cette contrainte est néanmoins modèle dépendante et peut être relâchée, voire supprimée, dans certains scénarios non-standard [24, 25].

L'objectif de l'expérience STEREO est d'étudier expérimentalement les deux solutions proposées pour rendre compte de l'anomalie des neutrinos de réacteur, à savoir une sous-estimation du flux émis par les réacteurs ou l'existence d'un nouvel état du neutrino, un neutrino stérile de masse comparable à 1 eV.

En 2017, la collaboration NEOS a publié [11] un nouveau résultat en comparant le spectre mesuré à 24 m du cœur du réacteur de puissance d'Hanbit (Corée) avec le spectre expérimental publié par Daya Bay [12] et obtenu avec des réacteurs et des détecteurs différents. La collaboration DANSS a également présenté de nouveaux résultats qui s'affranchissent de la dépendance du spectre émis par le réacteur en comparant les mesures réalisées avec le même détecteur à différentes distances du cœur du réacteur nucléaire de puissance de Kalinin (Russie) [13]. Ces résultats excluent une part significative de l'espace des paramètres autorisés par la RAA. Bien que l'analyse finale des effets systématiques des mesures de DANSS ne soit pas encore disponible, une analyse combinée [9, 10] des distorsions spectrales observées par NEOS et DANSS favorise l'hypothèse d'une oscillation vers un neutrino stérile avec des paramètres de mélange $\Delta m^2_{14}=1.3 \text{ eV}^2$ et $\sin^2(2\theta_{ee})=0.049\pm 0.023$ (2σ) [10] légèrement décalés par rapport à la zone des paramètres favorisés par la RAA, avec en particulier un angle de mélange plus faible. Ce résultat, basé sur des comparaisons relatives de spectres mesurés à différentes distances plutôt que sur des comparaisons des données avec les spectres théoriques prédits, n'est pas sensible au modèle de flux utilisé ni à l'excès par rapport aux prédictions du flux de neutrino observé par certaines expériences [5, 6, 7]. Il constitue un indice pour une interprétation de la RAA en terme de neutrino stérile.

Les expériences NEOS, DANSS et Daya Bay utilisent toutes des réacteurs commerciaux avec une contribution significative des isotopes de ^{239}Pu et ^{235}U au flux d'antineutrinos détectés. Grâce à la

très grande statistique accumulée, la collaboration Daya Bay a analysé l'évolution du flux d'antineutrinos détectés en fonction des fractions respectives de ^{239}Pu et ^{235}U présents dans le combustible [14]. Cette analyse favorise des scénarios où la plupart du déficit est due à l' ^{235}U contrairement à l'hypothèse d'une nouvelle oscillation qui devrait conduire à un déficit équivalent pour les 2 isotopes. Cependant, la précision de cette analyse n'est pas suffisante pour exclure l'existence d'un neutrino stérile et les analyses globales qui prennent en compte l'ensemble des données existantes continuent de favoriser une oscillation vers un nouvel état du neutrino [15]. De plus, il a été montré récemment que tous les effets d'évolution du combustible sur le flux mesuré n'avaient pas été pris en compte dans l'analyse de Daya Bay [16] et réduisaient l'importance de la préférence des résultats de Daya Bay pour une interprétation de la RAA par une prédiction erronée du flux de neutrinos émis par l' ^{235}U .

En plus du déficit moyen de 6,5%, plusieurs expériences [5, 6, 7] ont mis en évidence des distorsions significatives de la forme du spectre mesuré par rapport aux prédictions : un excès d'événements autour de 5 MeV a ainsi été observé. Cette anomalie de forme et la RAA pourraient avoir la même origine ou être causées par des effets indépendants. Des explications mettant en cause des effets expérimentaux dans la réponse des détecteurs ont été invoquées [17] tout comme l'existence d'interactions non-standard des neutrinos avec les baryons dans le scintillateur organique [18]. Une des questions ouvertes est de savoir si la distorsion de forme est similaire pour tous les isotopes ou plus forte pour l'un d'eux, et si le déficit observé dépend de la composition du combustible.

L'ensemble des résultats récents confirment la RAA mais ne permettent pas de conclure de manière significative sur son origine. L'hypothèse de l'existence d'un neutrino stérile, si elle ne permet pas d'expliquer toutes les anomalies observées dans le domaine de la physique des neutrinos, reste une solution envisageable pour expliquer les anomalies réacteur et gallium. Un éclairage nouveau et complémentaire pourrait être apporté en utilisant un combustible fortement enrichi en ^{235}U pour lequel les contributions des autres isotopes peuvent être négligées et les systématiques associées à l'évolution du combustible réduites. C'est ce que proposent les expériences en cours telles que STEREO [19], SoLid [20] et PROSPECT [21].

3. APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Dans ce contexte l'expérience STEREO fournira une mesure complémentaire très puissante. Installée à 10 m du cœur compact (< 1 m) du réacteur de recherche de l'Institut Laue Langevin à Grenoble (ILL, France), l'expérience STEREO bénéficie du fort enrichissement du combustible en ^{235}U (93%), ce qui supprime les effets d'évolution de la forme du spectre émis et permettra la mesure d'un spectre de référence des neutrinos issus uniquement de la fission de cet isotope. Afin de limiter l'impact de la méconnaissance du spectre émis, le volume de détection est segmenté en 6 cellules identiques alignées dans la direction du cœur du réacteur. Si le neutrino stérile existe, il doit signer sa présence par des oscillations dont la phase est proportionnelle à L/E , L étant sa distance de propagation depuis le cœur du réacteur et E son énergie. La signature de l'oscillation est donc une modulation du nombre d'interactions d'antineutrinos avec l'énergie des neutrinos et la distance du cœur à laquelle ils sont détectés. Elle sera pleinement exploitée par l'analyse de la forme du spectre détecté dans les différences cellules. Une analyse des distorsions relatives entre cellules est indépendante au premier ordre des paramètres du réacteur. La couverture en distance et en énergie du détecteur STEREO permettra d'atteindre une sensibilité suffisante pour établir ou réfuter l'existence du neutrino stérile dans l'essentiel du domaine des paramètres pointé par l'analyse des déficits. La proximité d'une source compacte et intense de neutrinos, une bonne

résolution en énergie et en distance, un contrôle du bruit de fond et des effets systématiques limités au niveau du pourcent sont les garants de cette mesure de précision à courte distance.

Le principe de détection des antineutrinos est la désintégration bêta inverse $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ (IBD), où les antineutrinos interagissent sur les protons du scintillateur hydrogéné constituant la cible du détecteur. Le scintillateur est dopé au Gd afin de signer la capture du neutron par la cascade de gammas associée (8 MeV). La signature de l'interaction de l'antineutrino est constituée par la coïncidence temporelle entre les 2 dépôts d'énergie. Le premier, le signal prompt est proportionnel à l'énergie cinétique du positron à laquelle s'ajoute 1,022 MeV provenant de son annihilation avec un électron. Ce signal est directement relié à l'énergie du neutrino par la relation $E_{\nu} \approx E_{\text{prompt}} + 1,8-1,022$ MeV, ou 1,8 MeV correspond au seuil de l'IBD. Le signal retardé, déclenché par la capture du neutron sur le gadolinium, a lieu quelques microsecondes plus tard, une fois le neutron thermalisé.

Le volume de détection est segmenté en 6 cellules de 0.89 m x 0.92 m x 0.37 m et alignées dans la direction du cœur du réacteur, ce qui permet une détection passive de la position du vertex de l'interaction neutrino avec une précision comparable à la taille du cœur et petite devant la longueur d'oscillation. Le volume cible est entouré par une couronne externe remplie d'un scintillateur liquide non dopé permettant de détecter les gammas qui s'échappent et d'améliorer ainsi la résolution en énergie et l'efficacité de détection du neutron. La lumière de scintillation est détectée par le dessus par 48 photomultiplicateurs (PMTs). Un volume tampon en acrylique sépare le scintillateur des PMTs et permet d'homogénéiser la réponse sur l'ensemble du volume de la cellule. Le couplage optique entre l'acrylique et les PMTs est assuré par un bain d'huile minérale. Le taux attendu d'interactions neutrino détectées dans les 1,8 m³ du détecteur STEREO est de l'ordre de 400 événements par jour. La séparation du signal neutrino du bruit de fond est alors un point clé de la mesure.

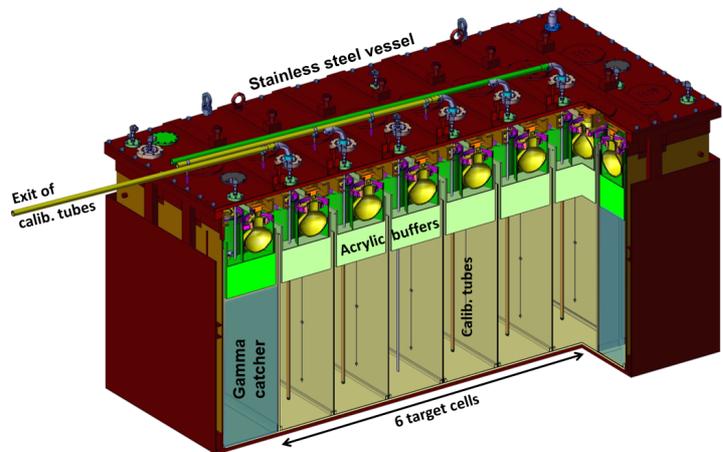


Figure 1 : Vue d'ensemble du détecteur STEREO

A l'ILL, la proximité du cœur du réacteur et les faisceaux de neutrons des expériences voisines induisent un bruit de fond important dans la zone expérimentale, nécessitant une protection du détecteur par d'imposants blindages de plomb et de polyéthylène, ainsi qu'un revêtement complet d'absorbants de neutrons thermiques, dopés au bore (B4C). L'autre source principale de bruit de fond est associée au rayonnement cosmique. En particulier, les muons d'origine cosmiques, dont on ne peut se protéger qu'en se plaçant en site souterrain, produisent des neutrons rapides par spallation dans les blindages et induisent des événements imitant la signature de l'IBD. Bien que le flux de rayons cosmiques soit réduit dans la zone expérimentale de STEREO par une couverture existante de béton et une forte épaisseur d'eau, un détecteur de muon situé au dessus de STEREO a été développé et il permet de signer le passage de cette particule et de rejeter tout événement associé moyennant un temps mort de quelques % pour l'expérience. Les propriétés de discrimination de forme du liquide scintillant permettent aussi une discrimination statistique des événements liés aux neutrons de spallation.

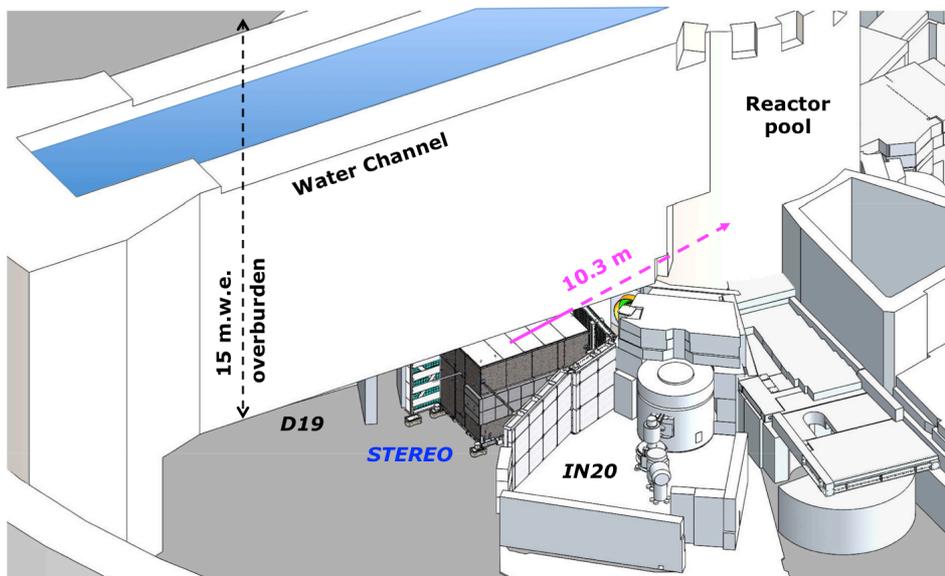


Figure 2 : L'expérience STEREO est installée à 10,3 m du coeur du réacteur de l'ILL, sous le canal de transfert.

Le tableau suivant rappelle les caractéristiques principales de STEREO et celles des autres expériences du domaine. Les expériences auprès des réacteurs de recherche permettent de se positionner à plus courte distance du réacteur, de bénéficier souvent d'un cœur compact ce qui améliore la sensibilité vers bas Δm^2 . Ils disposent souvent d'un combustible fortement enrichi en ^{235}U ce qui limite les effets d'évolution du combustible. Les expériences auprès des réacteurs commerciaux permettent de bénéficier d'un flux plus important et bénéficient souvent d'une protection de béton vis à vis du bruit de fond d'origine cosmique plus importante. La technologie utilisée pour le détecteur a aussi son rôle à jouer, ainsi la segmentation permet de définir des distances de vol différentes à l'intérieur d'un même détecteur et constitue un outil de réjection du bruit de fond. La résolution en énergie et la maîtrise des erreurs systématiques sont aussi les points clés d'une mesure de précision.

Experiment	Pth (MW)	Combustible	Protec (mwe)	Segmentation	Technologie	Distance (m)	Status
Chandler (US)	72	^{235}U	~10	6.2 cm (3D)	PS* + couches Li	5.5	
DANSS (RU)	3000	LEU*	~50	5 cm (2D)	Gd-doped PS	10.7-12.7	En cours
NEOS (K)	2800	LEU	~20	no	Gd-doped LS	23.7	Fini
Neutrino4 (RU)	100	^{235}U	~10	10 cm (2D)	Gd-doped LS	6-12	En cours
NuLat (US)	40/1790	$^{235}\text{U}/\text{LEU}$	~few	6.3 cm (3D)	Li-doped PS	4.7/24	
Prospect (US)	85	^{235}U	~few	15 cm (2D)	Li-doped LS	7-10	En cours
SoLid (BE)	72	^{235}U	~10	5 cm (3D)	PS + couches Li	5.5-10	En cours
STEREO (FR)	57	^{235}U	~15	25 cm (1D)	Gd-doped LS	8.8-11.2	En cours

*LEU = faiblement enrichi en ^{235}U

*PS = scintillateur plastique

*LS = scintillateur liquide

4. RESULTATS OBTENUS

4.1. SECURITE ET SURETE

L'implantation de STEREO à 10 m du cœur du réacteur de l'ILL est très contrainte par les exigences de sûreté. Les principaux risques traités sont la résistance au séisme (avec les normes « post Fukushima ») et son couplage avec la résistance au feu.

Après pré-dimensionnement par les différents groupes de la collaboration, l'ensemble de la structure du détecteur et de ses blindages a été validée par une entreprise extérieure certifiée (NECS). L'étude incendie a été sous-traitée par Efectis et la pose des protections certifiée a été réalisée en partie par la société Nuvia et par l'ILL pour le reste. Le dossier de sûreté final a été soumis à l'ASN par l'ILL en mars 2016. Un expert incendie de l'IRSN a été mandaté par l'ASN et une protection complémentaire a été installée suite à sa demande. L'accord final de l'ASN est arrivé le 9 novembre 2016 et le détecteur a été rempli avec le liquide scintillant dans la foulée.

La prise de données de STEREO se déroule sans aucun incident de sûreté depuis la mise en service de l'expérience.

4.2. RECONFIGURATION DE LA CASEMATE

L'ILL étant un réacteur de recherche, des faisceaux intenses de neutrons sont extraits du modérateur vers le hall expérimental pour être utilisés dans des expériences de diffusion de neutrons. Il en résulte un flux important de neutrons avec une énergie allant de quelques dizaines de meV à quelques MeV ainsi qu'un flux de gammas issus de capture neutron sur les matériaux environnants avec des énergies allant jusqu'à 9 MeV. Des nombreuses mesures de bruit de fond ont été menées sur site dans différentes conditions de fonctionnement des expériences voisines. Elles ont conduit à une reconfiguration majeure des murs frontaux et latéraux de la zone STEREO et au blocage de l'ancienne ligne faisceau de la casemate STEREO par un bouchon dédié. Au final les deux murs latéraux séparant STEREO des expériences voisines ont été complètement démontés et reconstruits en optimisant l'épaisseur et/ou la nature des matériaux. La zone frontale, face au réacteur a été renforcée par un mur en plomb et polyéthylène et couverte de B4C. L'efficacité de ces blindages a pu être validée au fur et à mesure de leur installation.

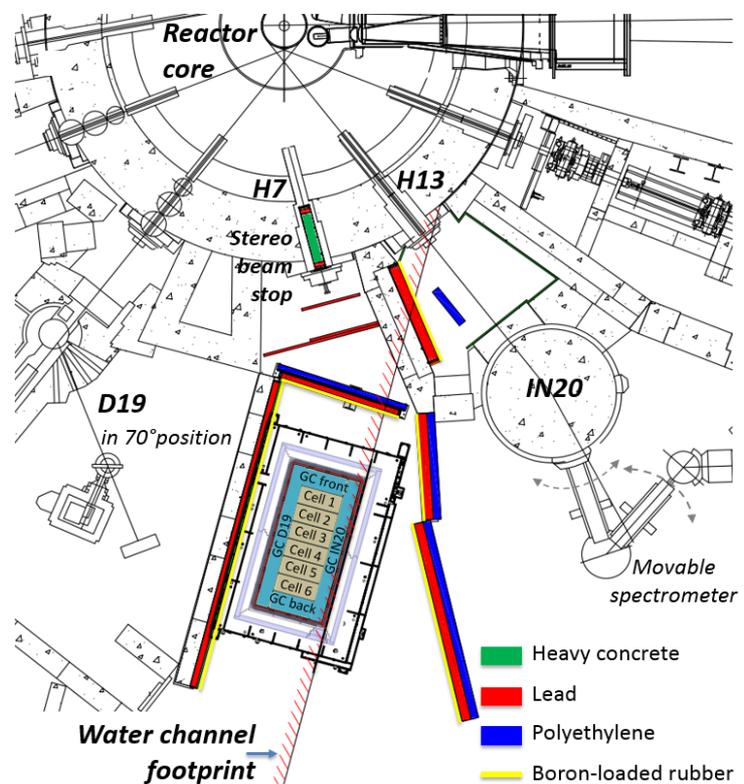


Figure 3 : Vue de dessus de l'expérience STEREO installés au niveau C du bâtiment réacteur de l'ILL de STEREO. Les blindages additionnels sont également représentés.

Afin de supporter le déplacement sur coussins d'air du détecteur et de ses blindages (93 tonnes) de son aire de

montage vers sa position nominale, toutes les goulottes existantes dans le sol de la casemate ont été renforcées et le béton de surface a été refait pour assurer une bonne planéité.

4.3. BLINDAGES DU DETECTEUR

La protection du détecteur contre les rayonnements externes est complétée par d'imposantes pièces de blindages en polyéthylène boré et plomb autour de la cuve interne ainsi que par un détecteur Čerenkov à eau qui couvre l'ensemble du dispositif et signe le passage de muons avec une efficacité supérieure à 99%. Une plaque de répartition a été ajoutée pour permettre le déplacement sur coussins d'air de l'ensemble du détecteur et de ses blindages. Le plomb entourant STEREO est sous la forme d'éléments de plomb coulé de plusieurs tonnes pour les murs verticaux, et de sandwichs plomb et acier pour le plafond, ce qui augmente la rigidité de la structure. L'entrée de ces pièces sur le site du réacteur a eu lieu en Mai 2016, profitant d'un court accès à la porte camion du réacteur. Le détecteur a également dû être protégé par un blindage magnétique en 3 couches (fer doux à l'extérieur des blindages, enveloppe de mu-métal à l'intérieur et tubes de mu-métal autour des PMTs) afin de réduire au niveau des PMTs les courants de fuite d'un fort champ magnétique (max 15T) potentiellement présent dans la zone expérimentale voisine.

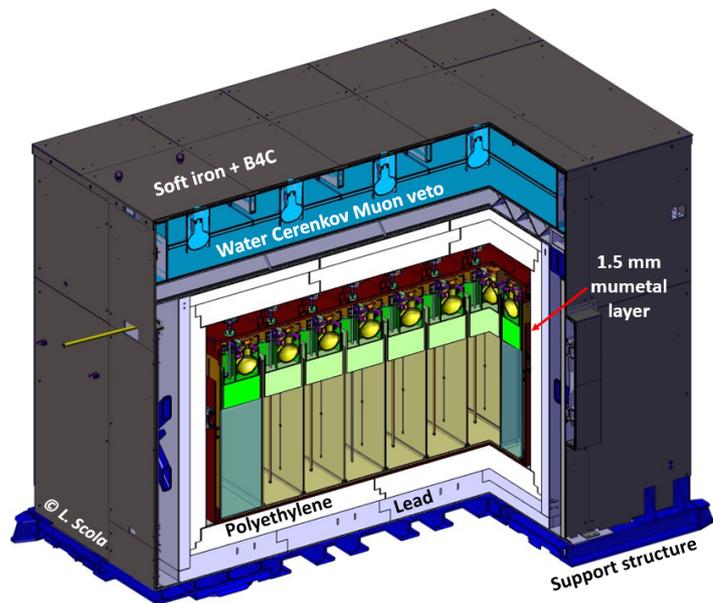


Figure 4 : Vue en coupe de l'assemblage de STEREO illustrant les différentes couches de blindage actif (veto muon) et passif.

L'assemblage sur la structure porteuse s'est déroulé durant l'été 2016 sur la zone dite de « montage », une vingtaine de mètres en retrait de la position de prise de données (de dimensions trop restreintes pour permettre le montage sur place). Le déplacement sur coussin d'air vers la position nominale a eu lieu en septembre 2016. Ce système a également permis un retrait aisé de STEREO de sa position de mesure en mars 2017 pour une intervention sur l'ancienne ligne de faisceau arrivée en fin de vie. Lors de cette opération le bouchon de la ligne de faisceau a été modifié et une partie des parois réfléchissantes internes de STEREO a été réparée avant de reprendre la prise de données en octobre 2017.

4.4. DETECTEUR VETO MUON

Bien que le canal de transfert qui se situe au dessus de STEREO procure une protection vis à vis du flux de muons cosmiques, les neutrons et gammas produits par spallation des muons constituent une source importante de bruit de fond. Le flux de muons verticaux est en moyenne atténué d'un facteur 4 dans la zone de STEREO, mais des variations ont été observées en fonction de l'angle d'incidence et de la position dans la zone expérimentale. Le détecteur veto muon permet d'étiqueter le passage d'un muon avec une efficacité supérieure à 99% pour les muons verticaux et de rejeter toute paire corrélée produite dans les 100 μ s suivantes. Afin de limiter la charge calorifique dans la zone de STEREO, le choix s'est porté sur un détecteur Čerenkov à eau de dimension 396 x 240 cm² couvrant l'ensemble du blindage. Le détecteur est rempli avec 25,6 cm

d'eau déminéralisée contenant du 4-Methylumbelliferone (4-MU) faisant office de convertisseur de longueur d'onde. La collection de lumière est assurée par 20 photomultiplicateurs (Hamamatsu R5912) disposés sur le dessus de la cuve. Le nombre moyen de photoélectrons collectés pour un muon vertical est de 530. Après correction des variations du flux de muon avec la pression atmosphérique, le taux de comptage mesuré dans le veto est de 660 muons/s à 1020 hPa.

4.5. LIQUIDE SCINTILLANT

Les composants de base du liquide scintillant de STEREO sont les solvants, le convertisseur de longueur d'onde et un composé organométallique permettant de fixer le Gd. L'utilisation d'alkyl benzène linéaire (LAB) comme base du scintillateur (80% en masse) a permis d'obtenir un scintillateur transparent au delà de 400 nm avec une longueur d'atténuation de 6,9 m à 430 nm, une compatibilité chimique avec les matériaux du détecteur et avec les exigences de sureté liées à la proximité du cœur du réacteur. Du PXE (20%) et du DIN (5%) ont été ajoutés afin d'améliorer le rendement lumineux (6500 photons/MeV) et la capacité à discriminer les reculs d'électrons par rapport aux reculs de protons. Cette dernière propriété est importante pour rejeter le bruit de fond induit par les rayons cosmiques, limitation ultime de la précision des mesures neutrinos proches de la surface. Le dopage en Gd, basé sur la chimie des β -dicétones, a été optimisé à 0,2% en masse en prenant en compte la coïncidence en temps du signal neutrino et la réjection du bruit de fond accidentel. Enfin une combinaison de 2 convertisseurs de longueur d'onde (PPO et bis-MSB) a été utilisée. Ainsi les 1602 kg de scintillateur du volume cible permettent d'obtenir un nombre de protons cible pour les neutrinos de $1,10 \times 10^{29}$. Le scintillateur de la couronne externe est identique à celui du volume cible à l'exception du dopage au Gd.

Les deux lots de liquide scintillant, pour le volume central de la cible et pour le volume de la couronne externe entourant la cible, ont été produits au MPIK courant 2016. 24 bidons scellés et inertés sous azote ont été livrés à Grenoble quelques jours avant le remplissage. L'opération du remplissage a été réalisée sans incident les 9-10 novembre 2016 suivant la procédure du dossier de sureté et dans le cahier des charges de la propreté du liquide (pas d'exposition aux poussières, ni à l'air, ni à l'eau). Il en a été de même pour l'opération de vidange/remplissage de l'année 2017.

4.6. DETECTEUR INTERNE

Le design du détecteur interne a été finalisé au printemps 2015. La partie la plus interne du détecteur est constituée d'un aquarium en acrylique de 12 mm d'épaisseur définissant le volume cible de dimensions $L \times l \times h = 2,23 \text{ m} \times 0,89 \text{ m} \times 1,23 \text{ m}$. Ce dernier est inséré dans une double cuve en acier inoxydable de dimensions $L \times l \times h = 3,10 \text{ m} \times 1,54 \text{ m} \times 1,51 \text{ m}$ définissant la couronne externe. La collection des photons de scintillations se fait à l'aide de 48 PMTs de 8'' de type Hamamatsu R5912-100. Les PMTs sont éloignés du scintillateur par un volume en acrylique de 20 cm pour une meilleure homogénéité de la réponse de la cellule. Un bain d'huile minérale assure le couplage optique entre les PMTs et le volume d'acrylique. Toutes les parois séparant les différents volumes utilisent les propriétés d'un film réfléchissant spéculaire (VM200™). Ce film est inséré entre 2 fines parois de 2 mm d'acrylique avec un filet en fil nylon de 100 mm assurant un gap d'air. Ce montage permet d'atteindre une grande réflectivité pour tous les angles incidents de la lumière émise dans le liquide.

La cuve interne du détecteur ainsi que les pièces en acrylique définissant les volumes internes ont été livrées pour assemblage au LPSC en Mars 2016. L'ensemble des signaux des photomultiplicateurs et capteurs embarqués ont été testés avant le transport sur site réacteur, réalisé en mai 2016 en même temps que les différentes pièces de blindage.

Durant la première phase de prise de données de novembre 2016 à mars 2017, plusieurs défauts ont altéré la réponse du détecteur. Le plus important d'entre eux a été la fuite du bain d'huile minérale assurant le couplage optique entre le liquide et les PMTs pour une cellule de la cible et une cellule de la couronne externe. Il en a résulté une perte d'un facteur environ 2,5 du nombre de photons détectés par rapport aux autres cellules. De plus la plupart des parois en acrylique ont perdu leur étanchéité au niveau du joint de colle périphérique. Les parois se sont remplies progressivement de liquide scintillant. La quantité de photons collectés sur l'ensemble du détecteur n'a pas été affectée mais la diaphonie entre cellules a augmenté progressivement, typiquement de 5% à 15%, rendant l'étude de la réponse du détecteur plus complexe.

Lors de l'arrêt du réacteur en 2017, les pièces en acrylique qui avaient fui et les plaques de séparations internes ont été réparées. Pour la phase 2, démarrée en octobre 2017, le détecteur se trouve dans une configuration plus homogène avec une collection de lumière stable et conforme aux spécifications.

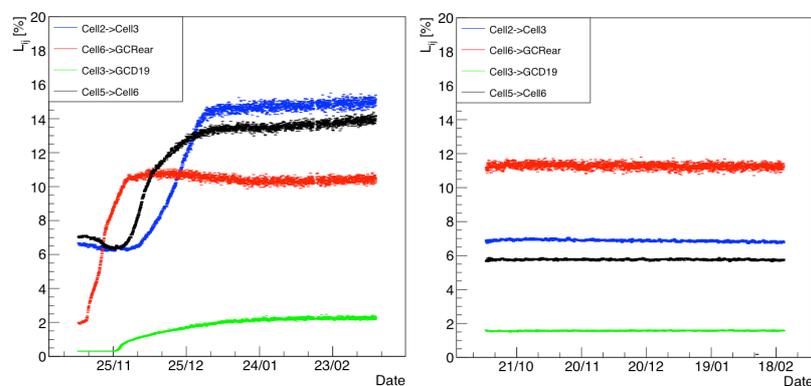


Figure 5 : Exemple d'évolution de la diaphonie entre cellules. A gauche pour la phase 1 et à droite pour la phase 2. L_{ij} est défini comme le rapport des charges collectées dans les cellules j et i pour un dépôt d'énergie unique dans la cellule i .

4.7. CALIBRATION ET CONTROLE DU DETECTEUR

Le détecteur est étalonné à l'aide d'un ensemble de sources radioactives émettant aussi bien des rayons gamma que des neutrons, et couvrant une grande partie de la gamme en énergie des neutrinos (0,5 à 4.4 MeV). Le volume actif du détecteur est exposé au rayonnement de ces sources grâce à des tubes étanches permettant d'introduire les sources dans les cellules et à deux systèmes automatisés qui font circuler les sources à l'extérieur du détecteur (sous la cuve et autour de celle-ci) (voir Figure 6). Ces systèmes ont été testés en juillet 2016 et installés au moment de l'insertion de la cuve dans ses blindages en septembre 2016. Durant la phase-1 des prises de données l'utilisation régulière de sources de calibration s'est révélée cruciale pour suivre précisément la réponse du détecteur. Ainsi pour la 2^e phase, 2 tubes de calibration interne supplémentaires ont été équipés. Les sources peuvent à présent être circulées dans 5 des 6 cellules.

Un étalon complémentaire d'injection de lumière à base de LED et de fibres optiques a été réalisé et testé lors du montage de la cuve. Il est utilisé pour l'étalonnage du gain des PMTs plusieurs fois par jour, assurant une précision de calibration inférieure à 0,5%.

Les étalonnages à l'aide des sources neutrons ont permis d'optimiser l'identification des neutrons, particule clef dans les bruits de fonds induits par les rayons cosmiques. Elles permettent également le contrôle de l'efficacité de détection. Les sources gammas ont servi à caractériser et suivre l'évolution de la diaphonie entre les cellules du détecteur, à renouveler fréquemment la détermination de l'échelle d'énergie et à mesurer les autres aspects de la réponse du détecteur,

comme l'asymétrie haut-bas ou la non-linéarité du liquide scintillant (quenching). Ensemble, les différents volets de l'étalonnage ont permis d'atteindre l'objectif de connaître l'échelle en énergie à 1% près.

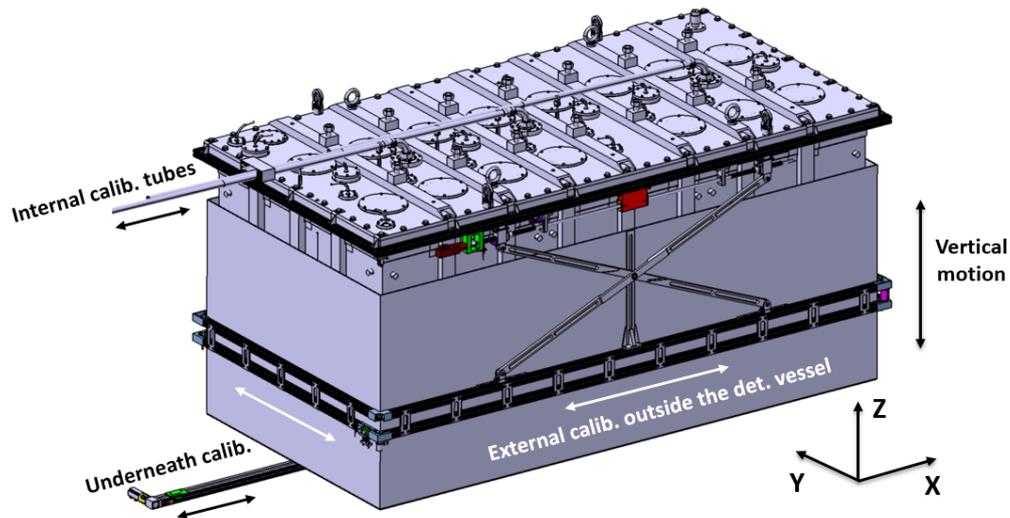


Figure 6 : Système de calibration utilisé par STEREO

4.8. ELECTRONIQUE ET ACQUISITION DE DONNEES

L'ensemble de l'électronique a été spécialement conçu pour STEREO depuis les bases des photomultiplicateurs jusqu'à l'acquisition de données. Le dispositif inclut des cartes Front-End 8 voies basées sur la lecture rapide des signaux des photomultiplicateurs par des FADC 250 MHz 14 bits, et un FPGA offrant un traitement en ligne rapide. Il inclut également une carte Trigger permettant le déclenchement de l'acquisition, la lecture des cartes Front-End et la commande de la carte de contrôle des LED utilisée dans le dispositif de calibration. La communication entre les cartes se fait par le fond de panier d'un châssis μ TCA. Un logiciel d'acquisition de données, dédié à STEREO et interfacé avec le logiciel cadre NOMAD développé à l'ILL, permet le contrôle et la surveillance de l'expérience. Les données sont transférées au LPSC puis au CCIN2P3 ou elles sont stockées.

Un premier démonstrateur 4 voies de la carte Front-End a été réalisé dès l'automne 2013. Ce prototype a permis de valider le concept prévu pour l'acquisition de données. Deux autres prototypes 8 voies ont été réalisés en 2014 ainsi que la carte Trigger, la carte de contrôle des LED et l'ensemble des bases des photomultiplicateurs.

L'ensemble de l'électronique de STEREO était prêt pour un démarrage de la prise de donnée dès la fin du remplissage, le 10 novembre 2016. Une période de mise en service d'environ 2 semaines a montré la bonne tenue du système d'acquisition jusqu'à plusieurs kHz de taux de comptage, au-delà des spécifications requises. Les réglages des différents paramètres de l'acquisition (seuils, mode de déclenchement, hautes tensions ...) ont pu être effectués rapidement grâce à la souplesse et à la polyvalence du système. Lors de la première période de prises de données, des défauts sont apparus sur certaines bases des PMTs du détecteur veto muon dont une résistance (composant CMS) s'est avérée sensible à l'humidité. L'ensemble des bases a été modifié lors de l'arrêt 2017. La prise de données de STEREO se déroule sans aucun incident depuis la remise en service.

4.9. REPARTITION DES RESPONSABILITES TECHNIQUES

Le tableau suivant recense les différentes responsabilités techniques et leur répartition entre partenaires pour la phase de construction et d'installation de l'expérience.

Partenaires	Contributions Techniques
CEA/Irfu	Coordination de projet – porte parole Décteur interne : cuve inox + pièces acryliques
IN2P3/LPSC	Coordination installation sur site Veto muon Electronique et acquisition de données Système d'injection de lumière Contrôle lent et monitoring Blindage mu-métal et polyéthylène
IN2P3/LAPP	Structure support blindage et coussins d'air Blindage plomb Systèmes de calibration externes Sources de calibration
MPIK Heidelberg	Liquide scintillant et dispositif de remplissage PMTs et mécanique associée
ILL	Aménagement aire expérimentale : blindages externes, maçonnerie, infrastructure. Etudes de sécurité

5. EXPLOITATION DES RESULTATS

Après son installation en novembre 2016, l'expérience STEREO a enregistré des données durant 2 cycles de fonctionnement du réacteur pour un total de 84 jours et pendant 2 périodes d'arrêt du réacteur pour un total de 32 jours. Cette première phase de prise de données a été suivie d'un long arrêt du réacteur pour maintenance d'environ 1 an. La collaboration a mis à profit cet arrêt pour effectuer des réparations sur le détecteur. La deuxième phase de l'expérience a démarré en octobre 2017 avec une longue période (144 jours) de prise de données réacteur à l'arrêt avant le redémarrage du réacteur en février 2018. Un premier cycle de 50 jours en réacteur ON a déjà été enregistré et un second vient de démarré.

L'exploitation des données acquises avec le détecteur STEREO se déroule en plusieurs étapes : d'une part la reconstruction du spectre en énergie des événements détectés, la recherche des paires corrélées de signaux prompt et retardés et la mesure du bruit de fond accidentel avec des critères de sélection optimisés. Le bruit de fond corrélé d'origine cosmique est quant à lui étudié avec précision lors des longues périodes d'arrêt du réacteur dont a bénéficié STEREO. Une procédure basée sur l'identification de la nature du signal prompt et la caractérisation du bruit de fond mesuré en période de réacteur OFF permet d'extraire le spectre neutrino mesuré dans chacune des 6 cellules. Enfin, la dernière étape consiste à comparer les spectres mesurés avec le modèle et de tester les différentes valeurs possibles de l'espace des paramètres du 4^{ème} neutrino. Un soin particulier a été apporté à l'étude des sources d'erreurs systématiques dans la réponse du détecteur, en particulier la diaphonie entre cellules et la non linéarité du scintillateur (quenching).

5.1. RECONSTRUCTION DE L'ENERGIE

L'objectif de STEREO est d'analyser la forme du spectre détecté dans les différences cellules et de la comparer à la prédiction. Etant donné qu'il est difficile de reproduire la diaphonie entre les

cellules et en particulier leur évolution temporelle avec une grande précision par une simulation Monte-Carlo, il a été décidé de développer une procédure de reconstruction de l'énergie, qui corrige au premier ordre la diaphonie entre les cellules. De cette manière l'ensemble des données peut être comparé à un seul modèle.

Le suivi de la diaphonie entre cellules est un point crucial pour maîtriser la réponse du détecteur. Différentes méthodes ont été développées. L'une basée sur l'analyse des données avec une source gamma de ^{54}Mn positionnée à différentes hauteurs dans la cellule et l'autre en utilisant les données neutrino, ce qui permet d'obtenir un suivi moyen de la diaphonie heure par heure. Les 2 méthodes donnent des résultats comparables.

La connaissance de la diaphonie entre les cellules est utilisée lors de la première étape de la procédure d'étalonnage du détecteur afin de sélectionner les événements pour lesquels le gamma dépose toute son énergie dans la cellule étudiée, et d'estimer le coefficient d'étalonnage de la cellule. Une seconde étape itérative permet d'affiner ces coefficients ainsi que la diaphonie entre cellules. La source de ^{54}Mn , émettant un γ de 835 keV a été largement utilisée pour définir l'échelle d'énergie du détecteur STEREO et étudier sa stabilité en temps et sa variation en fonction de la position de la source dans la cellule. Une statistique de l'ordre de 260 photoélectrons (PE) par MeV d'énergie déposée dans une cellule cible (360 PE/MeV pour le Gamma-Catcher -GC-) a été obtenue avec cette source conformément aux spécifications, à l'exception de la cellule 4 et d'une cellule du GC durant la phase 1 où le nombre de PE collectés est réduit d'un facteur 2,5 à cause de la perte de couplage optique. La bonne homogénéité de la collection de lumière dans la cellule a permis de limiter l'effet haut/bas à $\pm 4\%$, cet effet étant bien reproduit en simulation. Une résolution en énergie (σ/E) de 9% a ainsi été obtenue à 835 keV avec la source de ^{54}Mn placée au centre de la cellule et 9,4% pour une moyenne sur les 5 positions de mesure.

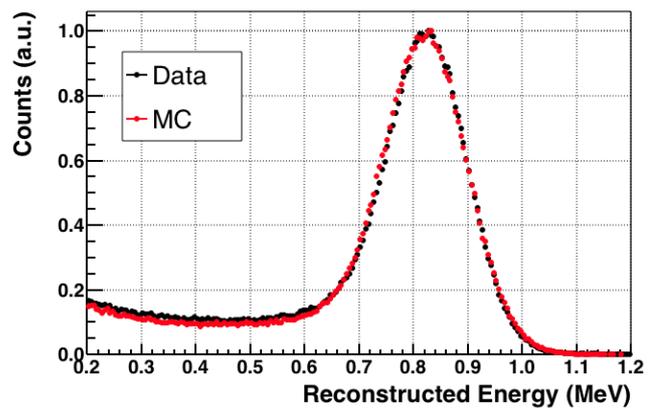


Figure 7 : Comparaison entre données et simulation Monte Carlo de la charge collectée dans la cellule 6 lorsque la source est déployée au centre de la cellule 6.

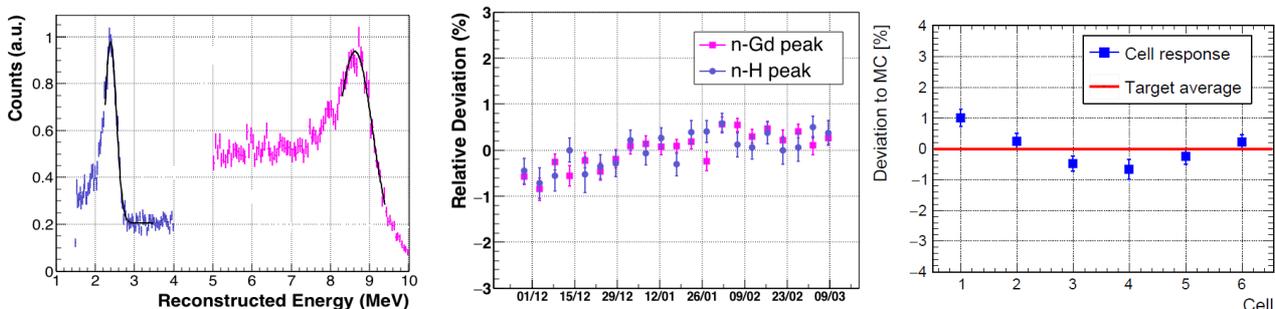


Figure 8 : A gauche, exemple d'énergie reconstruite pour des événements de capture neutron sur H et Gd. Au centre, l'évolution en temps de l'ajustement de la position de la valeur moyenne des pics autour de la valeur centrale. A droite, la déviation de l'énergie reconstruite par rapport à la simulation Monte-Carlo en fonction du numéro de cellule.

La stabilité de la reconstruction en énergie a été vérifiée par l'étude des neutrons de spallation induits par les muons cosmiques (voir Figure 8). Leur capture dans le détecteur induit des gammas de 2,2 MeV ou une cascade de gammas d'énergie totale de 8 MeV permettant de tester la reconstruction en énergie sur des événements distribués de manière plus homogène dans le détecteur et des dépôts d'énergie dans plusieurs cellules. Une stabilité à 0,35% près a été observée sur la première phase de prise de données malgré l'évolution de la diaphonie entre cellules. L'étalonnage en énergie avec la source de ^{54}Mn permet ainsi de corriger les effets de diaphonie sur toute la gamme d'énergie.

5.2. NON LINEARITE DU SCINTILLATEUR

L'efficacité de conversion énergie/lumière du scintillateur décroît lorsque la quantité d'énergie déposée par unité de longueur (dE/dx) augmente, entraînant des effets de non-linéarité intrinsèques en fonction de l'énergie déposée (quenching) qui sont plus marqués à basse énergie. Cet effet n'est pas corrigé dans la procédure de reconstruction de l'énergie mais est pris en compte dans la simulation Monte-Carlo. Le processus de quenching y est décrit par une loi de Birks [22] dont le coefficient k_B est représentatif du scintillateur. La valeur de k_B a été ajustée à une valeur de référence $k_B=0.096$ mm/MeV qui permet de reproduire la non linéarité observée à partir d'un ensemble de plusieurs sources radioactives dans la gamme de 0,5 à 4,4 MeV avec une précision inférieure à 1%. La même précision reste valide pour les comparaisons données-simulation dans le cas des événements de capture des neutrons de spallation sur l'hydrogène et le gadolinium.

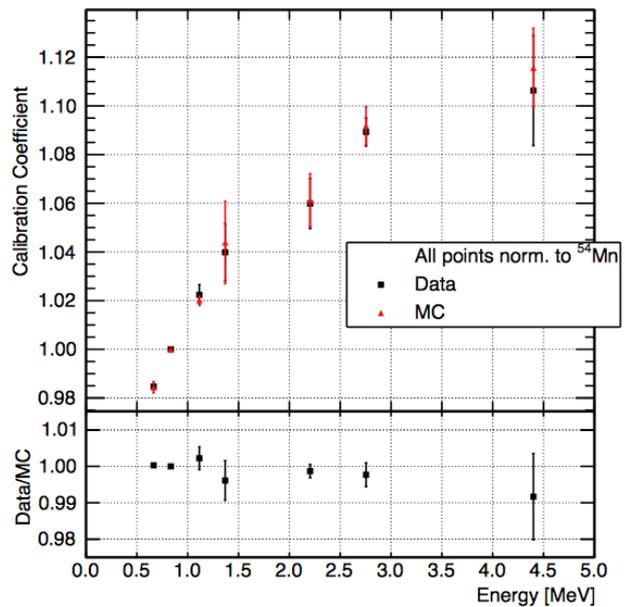


Figure 9 : Effet du quenching du scintillateur, évalué avec différentes sources déployées au centre d'une cellule. Les données et le Monte-Carlo sont normalisées au ^{54}Mn .

5.3. EFFICACITE NEUTRON

Avec un dopage du scintillateur en Gd de 0,2% en masse, le neutron de l'IBD est principalement capturé par un noyau de Gd. Cette capture donne lieu à un signal retardé caractéristique avec une cascade de gammas pour une énergie totale d'environ 8 MeV. Le temps moyen de capture est inférieur à 20 μs , ce qui permet une réjection efficace du bruit accidentel. Le déploiement de la source d'AmBe à différentes hauteurs dans les cellules de détection a permis d'étudier en détail l'efficacité neutron et de la comparer aux valeurs attendues par simulation. Le temps de capture observé entre les candidats IBD et les coïncidences observées avec la source neutron (recoil de proton, capture de neutron) sont en accord. Les variations relatives observées entre les cellules du bord (proches du GC contenant un scintillateur non dopé au Gd) et les cellules centrales sont bien reproduites dans la simulation, de même que les variations relatives entre le haut et le bas de chaque cellule. Un ajustement fin de la concentration de Gd est faite dans la simulation Monte Carlo afin de déterminer l'efficacité absolue de détection du neutron.

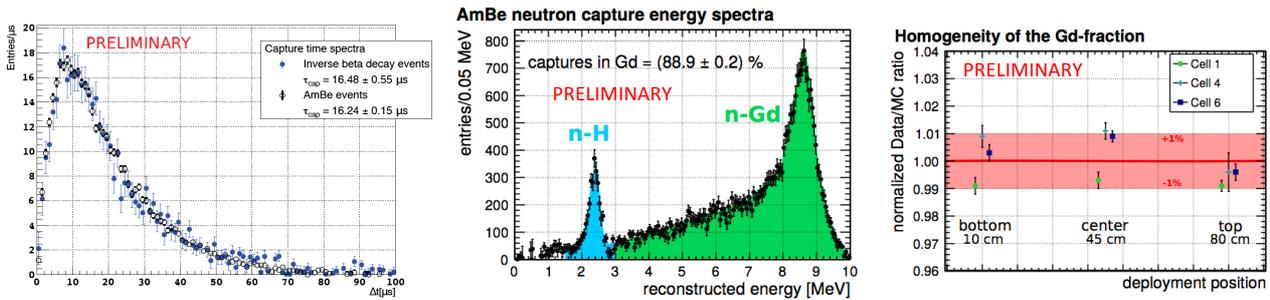


Figure 10 : A droite, temps de capture du neutron mesurés pour les événements IBD et pour une source AmBe. Au centre, le spectre en énergie reconstruite des captures neutron mesuré avec la source d'AmBe, les captures sur le Gd (en vert) représentent 88.9% du total. A droite, homogénéité de la fraction de Gd en fonction du numéro de cellule et de la position dans la cellule.

5.4. SELECTION DU SIGNAL NEUTRINO ET REJECTION DU BRUIT DE FOND

La sélection des événements neutrino est basée sur la coïncidence temporelle entre le positron (signal prompt d'énergie comprise entre 1,5 et 8 MeV) et le neutron (signal retardé d'énergie comprise entre 4 et 10 MeV) à l'intérieur d'une fenêtre en temps de 70 μ s. Cette sélection doit faire face à deux types de bruit de fond : d'une part la coïncidence accidentelle de 2 signaux d'origines différentes et d'autre part la coïncidence de 2 signaux ayant la même origine physique.

Le bruit de fond accidentel est mesuré en permanence avec une très grande précision en utilisant la méthode des fenêtres décalées en temps. Il dépend fortement des conditions expérimentales des expériences voisines, mais sa contribution a pu être réduite à moins de 10% du signal neutrino par l'installation d'importants blindages autour de la cible de STEREO. L'offset résiduel dans la distribution des temps de capture du neutron des candidats IBD est compatible avec zéro avec une incertitude de 0,2% du signal neutrino, montrant ainsi la bonne maîtrise de la mesure du bruit de fond accidentel.

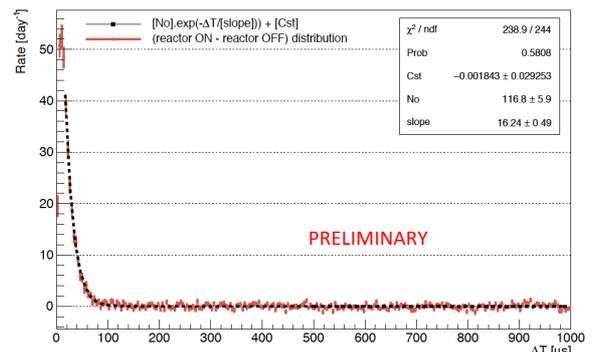


Figure 11 : Distribution des temps de capture du neutron des candidats IBD après soustraction des événements accidentels.

Le bruit de fond corrélé est caractérisé lors des périodes d'arrêt du réacteur. Il provient principalement de l'interaction des particules cosmiques, majoritairement des muons, dans les blindages autour de STEREO. La rejection des événements ayant lieu dans les 100 μ s suivant l'identification du passage d'un muon (signal dans le veto muon ou signal de haute énergie dans le détecteur interne) et la sélection de paires isolées en temps (absence d'événement dans les 100 μ s suivantes et précédentes) permet de rejeter une partie importante du bruit de fond corrélé au détriment d'un temps mort de 11.5%. Cependant, tout le bruit de fond induit par les rayons cosmiques n'est pas éliminé ainsi, car les muons traversant les blindages ne sont pas détectés. L'ajout de critères topologiques supplémentaires et de discrimination (PSD) de la nature de la particule observée (différence des constantes de temps de décroissance du scintillateur selon le type de particule qui interagit) a permis d'améliorer la sélection des événements neutrinos. Le bruit de fond corrélé d'origine cosmique constitue néanmoins la source de bruit de fond résiduel la plus importante de STEREO avec une fréquence équivalente à celle du signal neutrino.

Le spectre prompt mesuré en période de réacteur OFF fait apparaître différentes contributions du bruit de fond résiduel : d'une part un fond associé aux reculs de proton suivis d'une capture neutron qui s'étale sur toute la gamme d'énergies mesurées, une contribution des cascades multi-neutrons observée aux énergies correspondant à la capture du neutron sur l'hydrogène (2.2 MeV) et sur le Gd (8 MeV) et enfin une contribution associée aux diffusions inélastiques de neutron sur le ^{12}C suivi d'une capture neutron.

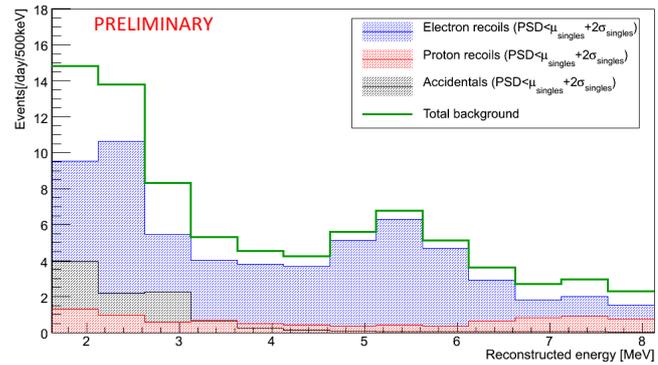


Figure 12 : Spectre en énergie du signal prompt mesuré en réacteur OFF

5.5. EXTRACTION DES SPECTRES NEUTRINO

Malgré une protection de béton et d'eau (15 m équivalent eau) située au dessus de la zone expérimentale, STEREO reste sensible à la variation du rayonnement cosmique avec la pression atmosphérique. Les mesures réalisées pendant la longue période d'arrêt du réacteur ont clairement mis en évidence une dépendance du flux de muons et du taux de paires corrélées. D'autre part nous avons mesuré une variation de la variable PSD en fonction de la température du liquide, qui change de quelques degrés entre les périodes ON et OFF, ainsi qu'en fonction des fuites de lumière. Ces effets ne peuvent être négligés lors de l'extraction du signal neutrino par la méthode classique de soustraction ON-OFF et nécessiteraient des corrections difficiles à mettre en œuvre et à contrôler.

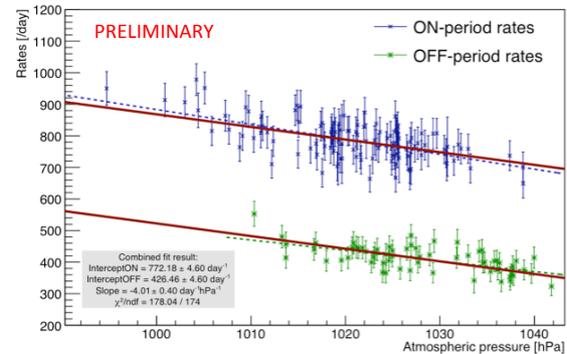


Figure 13 : Dépendances des taux mesurés avec la pression atmosphérique.

Après une caractérisation soignée du bruit de fond corrélé, la collaboration STEREO a fait le choix de développer une méthode alternative et originale, basée sur des caractéristiques du bruit de fond corrélé indépendantes de la pression atmosphérique, de la température du liquide ou des fuites de lumière. Le pouvoir discriminant du scintillateur permet en effet d'identifier avec la variable PSD les composantes électron de recul A_e et proton de recul A_p du signal prompt.

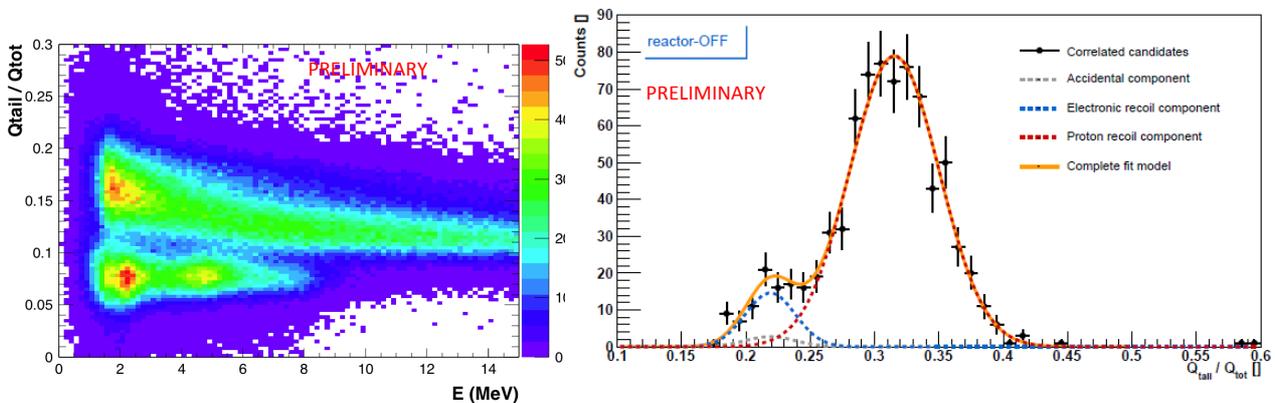


Figure 14 : A gauche, distribution de la variable PSD (Q_{tail}/Q_{tot}) en fonction de l'énergie reconstruite pour des événements mesurés en réacteur OFF. A droite, projection du PSD pour un bin d'énergie de 1 MeV à 3,375 MeV. La composante proton de recul est en rouge et la composante électronique en bleu.

La grande statistique accumulée lors de l'arrêt du réacteur a permis de déterminer avec précision ce rapport A_e/A_p et de montrer qu'il était indépendant de la pression atmosphérique pour chaque bin d'énergie. Cette propriété a été mise à profit pour extraire le signal neutrino à partir d'un ajustement de la variable PSD mesurée lors des périodes réacteur ON : la composante A_p est toujours identifiable séparément, la composante A_e est fixée grâce au rapport constant déterminé dans les périodes réacteur OFF, la composante neutrino est alors la contribution excédentaire parmi les reculs d'électrons. Cette méthode permet d'obtenir les spectres neutrino mesurés dans les 6 cellules de détection et de s'affranchir de la soustraction ON-OFF et des corrections nécessaires à faire entre les deux périodes.

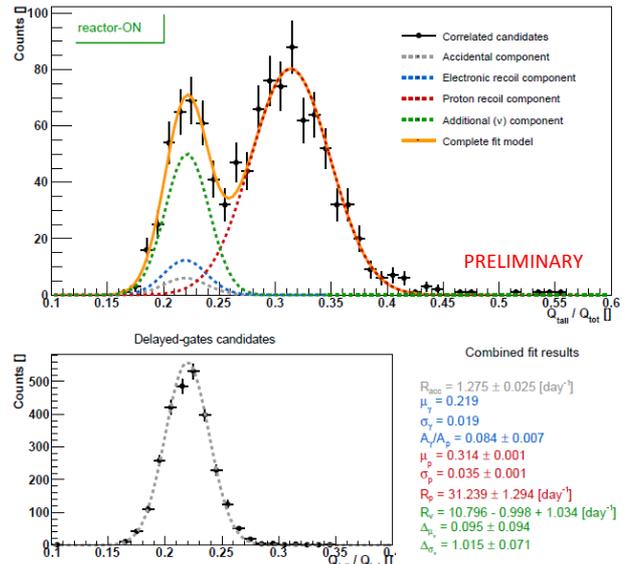


Figure 15 : Exemple d'extraction du signal neutrino pour le bin d'énergie de 3,375 MeV mesuré en réacteur ON. La composante neutrino est représentée en vert.

5.6. PREMIERS RESULTATS

Les premiers résultats présentés en mars 2018 [23] pour la phase I sont basés sur l'étude du rapport des spectres mesurés dans les 6 cellules du détecteur. Cela permet de s'affranchir au premier ordre de la forme et de la normalisation du spectre des neutrinos émis par le réacteur et de l'efficacité absolue de détection. La cellule 1 est considérée comme la cellule de référence. Les rapports attendus des 5 autres spectres mesurés avec celui de la cellule 1 sont comparés avec les mêmes rapports attendus par le modèle de réponse du détecteur. L'analyse statistique est faite en construisant une loi de χ^2 à partir des 5 rapports de spectre de 10 bins en énergie chacun compris entre 1,5 à 7 MeV et en prenant en compte la corrélation entre les différents rapports du fait de leur normalisation commune avec la cellule 1. Des paramètres de nuisance sont ajoutés afin de prendre en compte les incertitudes systématiques : l'incertitude relative sur la normalisation des cellules entre elles estimée à 1,7 % (3,4% pour la cellule 4 qui a un buffer vide), l'incertitude non corrélée sur l'échelle d'énergie, dominée par les différences résiduelles entre cellules et estimée à 1,5% et l'incertitude sur l'échelle d'énergie commune à l'ensemble des cellules relative à l'évolution temporelle de la reconstruction en énergie et estimée à 0,35%.

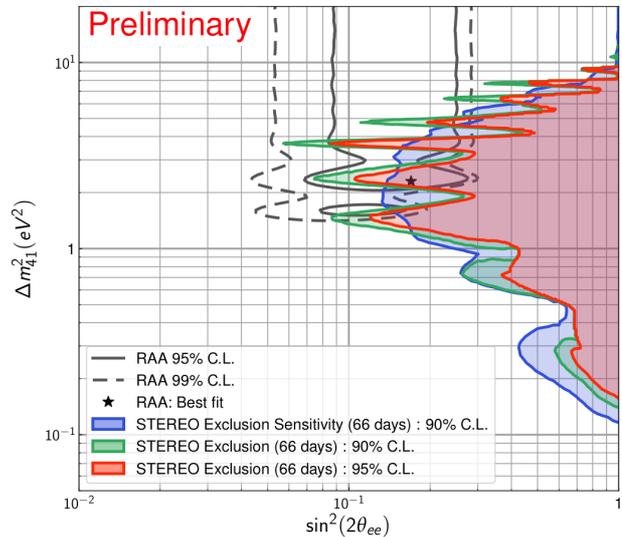


Figure 16 : Contours d'exclusion des paramètres d'oscillation vers un 4ème neutrino en rouge et vert). La région en bleue représente la sensibilité de rejection pour une précision statistique de 66 jours de données. Les courbes en noir délimitent les scénarios les plus probables de la RAA, avec une étoile marquant le cas le plus vraisemblable.

Les résultats obtenus avec une statistique de 66 jours effectifs de données en réacteur ON et une puissance moyenne de 57 MW et 138 jours en réacteur OFF excluent une part significative de

l'espace des paramètres attendu de l'hypothétique 4^{ème} neutrino. Les zones rouge et verte de la figure ci-contre représentent les zones des paramètres (angle de mélange en abscisse et écart des masses en ordonnées) rejetées avec respectivement 90 et 95% de niveau de confiance. La zone bleue représente la sensibilité théorique de réjection pour une analyse avec une statistique correspondant à 66 jours de données. La zone des paramètres autorisés par l'anomalie des neutrinos de réacteur est délimitée par les courbes grises. Le cas le plus probable, représenté par une étoile est rejeté à 98,8% de niveau de confiance par l'analyse des données de STEREO.

Les performances obtenues lors de la première phase de prise de données et l'analyse réalisée avec une faible statistique démontrent que STEREO a atteint un excellent niveau de contrôle des incertitudes de détection pour lui permettre de répondre à la question sur l'existence d'un neutrino stérile dans la zone des paramètres pointés par l'anomalie des neutrinos de réacteur. L'expérience continuera de prendre des données jusque fin 2019 ce qui devrait permettre d'acquérir une statistique de plus de 300 jours de données avec le réacteur en fonctionnement. L'étoile jaune marque le point à $\Delta m^2_{14}=1.3 \text{ eV}^2$ et $\sin^2(2\theta_{ee})=0.049$ privilégié par les dernières analyses combinées [10].

Grâce au combustible très enrichi en ²³⁵U de l'ILL, l'expérience STEREO fournira aussi une nouvelle référence de spectre neutrino émis par la fission de cet isotope, très attendue par la communauté.

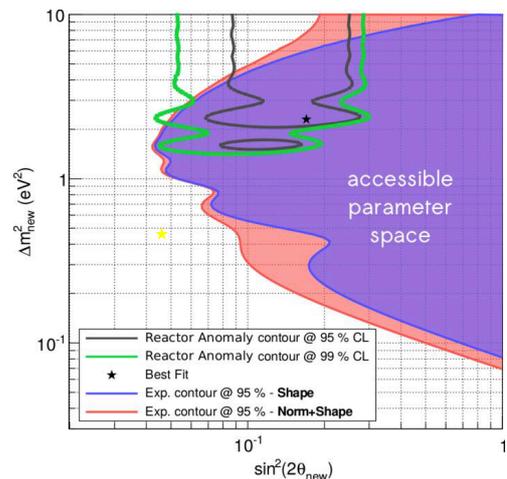


Figure 17 : Sensibilité de réjection pour une précision statistique de 300 jours de données.

6. BILAN 2013-2018

Le projet STEREO avait l'objectif ambitieux de concevoir, fabriquer, installer et d'exploiter un détecteur de neutrino sur un site nucléaire dans un délai de 4 ans. Il a débuté avec la caractérisation sur site des différentes sources de bruit de fond et la conception du détecteur central et de tous ses blindages. L'expérience a dû faire face à un bruit de fond intense produit par les autres expériences présentes au niveau C du réacteur. De nombreux renforts de blindages ont alors été étudiés et réalisés. L'ensemble de ces constructions a dû être validé par les études sismiques et incendie générant délai et surcoût. Une reconfiguration significative de la casemate a été entreprise afin d'isoler le détecteur du bruit extérieur généré par le réacteur. Ce travail conséquent a été réalisé dans le cadre d'un dossier de sûreté validé par l'Autorité de Sûreté Nucléaire, avec d'importantes contraintes sur la tenue sismique et la résistance au feu de l'appareillage.

Un effort soutenu de la collaboration a permis le démarrage de l'expérience en novembre 2016. Des défauts dans la réalisation des pièces en acrylique du détecteur ont rendu l'étude de la réponse du détecteur plus complexe. Malgré les difficultés rencontrées lors de la première phase de prise de données, le détecteur a maintenant atteint son fonctionnement nominal, des outils d'analyse originaux ont été développés pour l'extraction du signal neutrino et les premiers résultats présentés en mars 2018 excluent une partie significative de l'espace des paramètres attendu de l'hypothétique 4^e neutrino.

L'arrêt imposé du réacteur en 2017 a nécessité le retrait du détecteur de la zone de mesure, ce qui a été mis à profit pour effectuer les réparations sur le détecteur. Depuis mars 2018, STEREO continue à accumuler des données et va gagner en précision en accumulant 4 fois plus de données que la

phase I d'ici fin 2019. La précision finale escomptée dans la proposition d'expérience devrait alors être atteinte. La couverture du domaine d'existence du neutrino stérile par STEREO et ses concurrents devrait alors permettre de trancher définitivement la question. STEREO mesurera de plus un nouveau spectre de référence pour la fission de ^{235}U . Cette information complémentaire à l'analyse d'oscillation sera une donnée précieuse pour toutes les mesures de précision en cours et à venir auprès des réacteurs.

Le développement du projet STEREO et la présentation de ses premiers résultats ont fait l'objet de 31 présentations en conférences internationales. La description technique du détecteur STEREO et la validation de la reconstruction en énergie des événements font l'objet d'une publication qui a été soumise au journal JINST [12]. Un article sur les premières contraintes apportées par STEREO sur le neutrino stérile devrait être soumis dans les jours à venir. Les résultats de STEREO sont visibles, attendus par la communauté. Ils marquent le succès de ce projet.

7. POINT SUR LES MOYENS. PERSPECTIVES

La phase de construction de STEREO est actuellement terminée et les opérations de maintenance réalisées durant l'été 2017 sont également terminées. La période d'exploitation des données a commencé par l'étude des données de la phase 1 et se poursuit actuellement avec l'étude des données de la phase 2 qui a débuté en mars 2018. La sensibilité finale devrait être atteinte fin 2019 après les six cycles réacteurs prévus en 2018 et 2019, soit plus de 300 jours de données en réacteur ON et une période équivalente en réacteur OFF. Un nouveau grand arrêt du réacteur est prévu en 2020 au cours duquel STEREO devra être définitivement démonté. L'analyse des données et la rédaction des derniers articles scientifiques s'achèveront vers 2021.

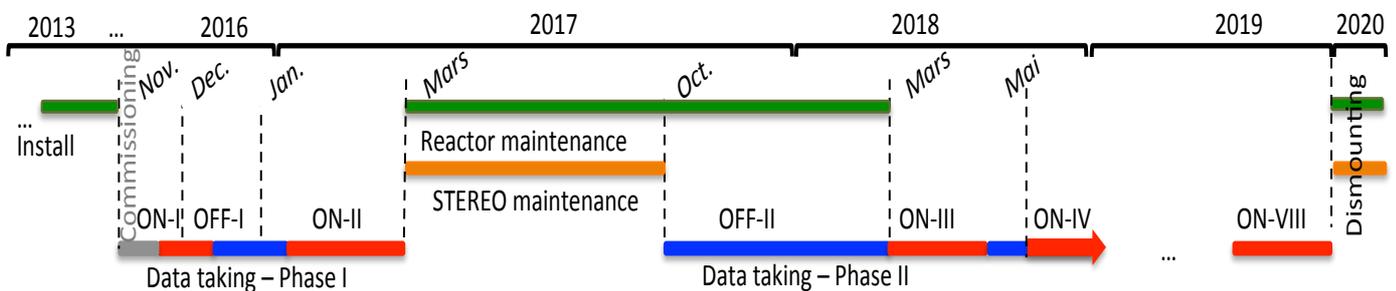


Figure 18 : Les différentes phases du projet STEREO

Les paragraphes suivants présentent de manière synthétique les ressources humaines et financières qui ont été nécessaires à la réalisation du projet STEREO.

7.1. RESSOURCES FINANCIERES

Le projet a été financé en grande partie par l'ANR et par les différents partenaires : CEA/Irfu, IN2P3, MPIK Heidelberg et ILL.

Les études sismiques et incendies ont occasionné des surcouts qui ont été pris en charge temporairement par l'ILL et le MPIK. Un accord de collaboration entre les différents partenaires a été signé afin de statuer sur la répartition de ce surcout entre les partenaires. Les ressources financières demandées actuellement concernent uniquement la part du surcout revenant à l'IN2P3 et les frais de démantèlement prévu en 2020.

Partenaires	Sources	Montant des financements HT		Total financements	Dépenses
CEA	ANR - Stereo	240 625 €		430 625 €	415 187 €
	SPhN		190 000 €		
IN2P3	LPSC-ANR- Stereo	209 950 €		658 750 €	660 743 €
	LAPP-ANR- Stereo	321 000 €			
	LPSC		40 000 €		
	Univ. Grenoble 2013		10 000 €		
	Univ. Grenoble 2015		26 000 €		
	IN2P3		51 800 €		
MPIK	MPIK		419 500 €	419 500 €	646 400 €
ILL	ILL		115 000 €	115 000 €	196 554 €
		Financement Total ANR	Financement Total Part.	Financement Total Projet	Dépenses Total Projet
		771 575 €	852 300 €	1 623 875 €	1 918 884 €

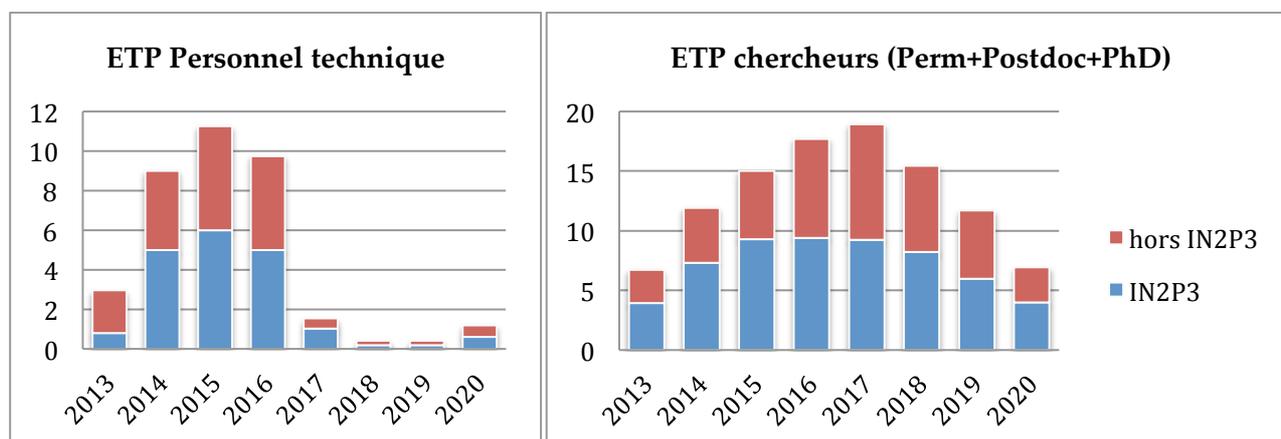
	Financé jusqu'en 2017	Total des dépenses	Balance
Construction	1 623 875 €	1 918 884 €	-295 009 €
Prévision démontage		30 800 €	-30 800 €
TOTAL Projet			-325 809 €

7.2. RESSOURCES HUMAINES

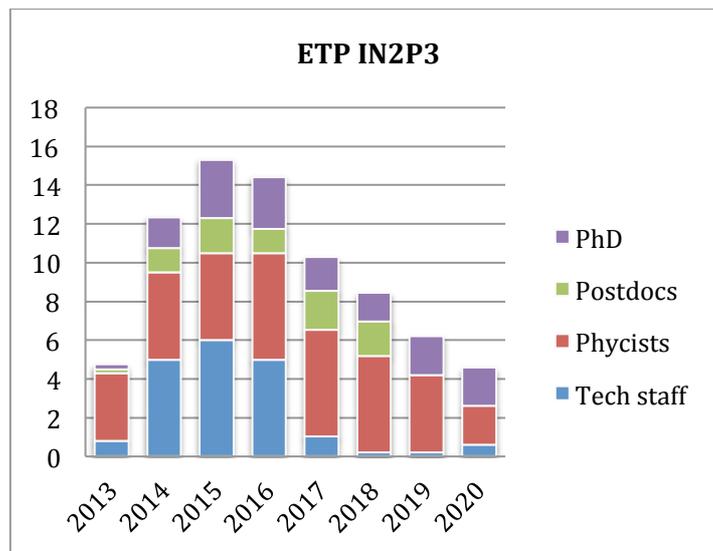
La collaboration STEREO est une petite collaboration d'un peu plus de 20 physiciens permanents, PhD et doctorants. Les laboratoires impliqués à l'IN2P3 sont le LAPP et le LPSC avec 6 physiciens permanents. Lors de la phase de construction, les personnels techniques des différents laboratoires ont été fortement impliqués (voir tableau des responsabilités techniques au paragraphe 4.9), leur contribution actuelle ne concerne que du soutien ponctuel mais ils seront à nouveau sollicités en 2020 pour la phase de démontage.

7.2.1 REPARTITIONS DES RESSOURCES HUMAINES

La répartition en équivalent temps plein des ressources humaines sur l'ensemble du projet est présentée dans les tableaux ci-dessous qui distinguent les équipes de l'IN2P3 de celles du reste de la collaboration. La place de l'IN2P3 est donc parfaitement visible aussi bien pour les contributions techniques que pour l'implication de ses physiciens.



L'implication des personnels de l'IN2P3 est présentée ci-dessous en distinguant la part des services techniques et des chercheurs permanents ou non. Les physiciens permanents impliqués à l'IN2P3 sont au nombre de six dont, au LAPP, un enseignant chercheur, P. Del Amo Sanchez et un chercheur émérite, H. Pessard ; au LPSC, 3 chercheurs CNRS, S. Kox, J.S Real et A. Stutz et un enseignant chercheur J. Lamblin. Ils consacrent tous désormais 100% de leur temps de recherche à l'expérience STEREO. Une thèse est en cours au LPSC et le recrutement d'un étudiant en thèse est escompté dans chacun des 2 laboratoires à la rentrée 2018. Actuellement chacun de ces groupes est renforcé par un contrat postdoctoral. Cependant, les deux contrats postdoctoraux finissent en 2018, alors que l'analyse des données et la rédaction d'articles s'achèveront vraisemblablement en 2021.



7.3. IMPLICATION ACTUELLE DANS LE FONCTIONNEMENT ET L'ANALYSE

En plus de la coordination des travaux d'installation ou de réparation sur site, les physiciens du LPSC et du LAPP assurent l'essentiel de la responsabilité de la prise de données : depuis la coordination des shifts et des prises de données, l'expertise de l'acquisition, le transfert des données au CCIN2P3, l'expertise du logiciel STEREO pour le LPSC jusqu'au système de calibration externe pour le LAPP. Ils sont également fortement impliqués dans l'analyse des données, occupant des rôles majeurs dans l'exploitation des données de calibration, la reconstruction en énergie, l'étude et la discrimination des bruits de fond (cosmiques, neutrinos réacteur à l'arrêt), la simulation Monte-Carlo et l'extraction statistique des paramètres d'oscillation. En somme, les deux laboratoires de l'IN2P3 assurent à l'Institut un fort impact et une grande visibilité sur l'expérience STEREO, et, avec un soutien approprié, resteront des éléments clés de la collaboration jusqu'à la fin de l'activité scientifique vers 2021.

8. REFERENCES

- [1] Th. A. Mueller *et al.*, Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra, *Phys. Rev. C* **83** (2011) 054615.
- [2] P. Huber, On the determination of anti-neutrino spectra from nuclear reactors, *Phys. Rev. C* **84** (2011) 024617. Erratum: *Phys. Rev. C* **85** (2012) 029901.
- [3] G. Mention *et al.*, The reactor antineutrino anomaly, *Phys. Rev. D* **83** (2011) 073006.
- [4] Y. Abe *et al.* (Double Chooz Collaboration), Improved measurements of the neutrino mixing angle θ_{13} with the Double Chooz detector, *JHEP* **1410** (2014) 086. Erratum: *JHEP* **1502** (2015) 074.
- [5] S. Schoppmann *et al.* (Double Chooz Collaboration), Latest results of Double Chooz,

Published in PoS HQL2016 (2017) 010.

- [6] F. P. An *et al.* (Daya Bay Collaboration), Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay, *Chin. Phys. C* **41** (2017) 013002.
- [7] J. H. Choi *et al.* (RENO Collaboration), Observation of Energy and Baseline Dependent Reactor Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 211801.
- [8] A. C. Hayes, P. Vogel, Reactor neutrino spectra, *Ann. Rev. Nucl. Part. Scien.* **66** (2016) 219
- [9] M. Dentler, A. Hernández-Cabezudo, J. Kopp, P. Machado, M. Maltoni, I. Martinez-Soler and T. Schwetz, Updated global analysis of neutrino oscillations in the presence of eV-scale sterile neutrinos, arXiv:1803.10661 [hep-ph] (2018)
- [10] S. Gariazzo, C. Giunti, M. Laveder and Y.F. Li, Model-Independent anti-neutrino Short-Baseline Oscillations from Reactor Spectral Ratios, arXiv:1801.06467 [hep-ph] (2018)
- [11] Y.J. Ko *et al.* (NEOS collaboration), Sterile Neutrino Search at the NEOS Experiment, *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017) 121802.
- [12] F.P. An *et al.* (Daya Bay Collaboration), Improved measurement of the reactor antineutrino flux and spectrum at Daya Bay, *Chin. Phys. C* **41**, 013002 (2017).
- [13] I. Alekseev *et al.* (DANSS Collaboration), Search for sterile neutrinos at the DANSS experiment, arXiv:1804.04046 [hep-ph] (2018)
- [14] F.P. An *et al.* (Daya Bay Collaboration), Evolution of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay, *Phys. Rev. Lett.* **118** (2017) 251801.
- [15] M. Dentler *et al.*, Sterile Neutrinos or Flux Uncertainties? - Status of the Reactor Anti-Neutrino Anomaly, *JHEP* **1711** (2017) 099.
- [16] P. Huber et P. Jaffke, Neutron capture and the antineutrino yield from nuclear reactors, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) n°12 122503
- [17] G. Mention *et al.*, Reactor antineutrino shoulder explained by energy scale nonlinearities?, *Phys. Lett. B* **773** (2017) 307
- [18] J.M. Berryman, V. Brdar and P. Huber, nuclear and Particle Conspiracy Solves Both Reactor Antineutrino Anomalies, arXiv:1803.085506 [hep-ph] (2018)
- [19] N. Allemandou *et al.* (STEREO collaboration), The STEREO experiment, submitted to JINST ([arXiv:1804.09052](https://arxiv.org/abs/1804.09052)).
- [20] Y. Abreu *et al.* (SoLid Collaboration), A novel segmented-scintillator antineutrino detector, *JINST* **12**, no 4, P04024 (2017)
- [21] J. Ashenfelter *et al.* (PROSPECT Collaboration), The PROSPECT Physics Program, *J. Phys. G : Nucl. Part. Phys.* **43** 113001 (2016)
- [22] J. Birks, *The theory and practice of scintillation counting*, 1964
- [23] D. Lhuillier, *53eme Rencontres de Moriond, La Thuille* (2018)
- [24] B. Dasgupta and J. Kopp, A menage à trois of eV-scale sterile neutrinos, cosmology, and structure formation, *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014)
- [25] C.E. Yaguna, Sterile neutrino production in models with low reheating temperatures, *JHEP* **06** (2007) 002