

Equipe Neutrino

Projets STEREO, RICOCHET, DUNE

Composition actuelle de l'équipe

- ▶ **5 permanents : 2 EC + 3 CNRS**
 - ▶ Jacob Lamblin (MC)
 - ▶ Jean-Sébastien Réal (DR)
 - ▶ Jean-Stéphane Ricol (CR)
 - ▶ Arnaud Robert (MC, mutation à partir de janvier 2020)
 - ▶ Anne Stutz (CR, responsable d'équipe)
- ▶ **1 post-doc :**
 - ▶ Matthieu Licciardi,
 - ▶ postdoc IN2P3 à partir du 1^{er} septembre 2019
 - ▶ Recherche de neutrinos stérile auprès du réacteur de l'ILL, production d'un spectre de référence des neutrinos de l' ^{235}U , analyse combinée avec PROSPECT
- ▶ **1 doctorant :**
 - ▶ Mathieu Vialat
 - ▶ Codirection de thèse avec l'ILL, soutenance prévue en 2021
 - ▶ Analyse finale des données de STEREO

Evolution de l'équipe

Départs

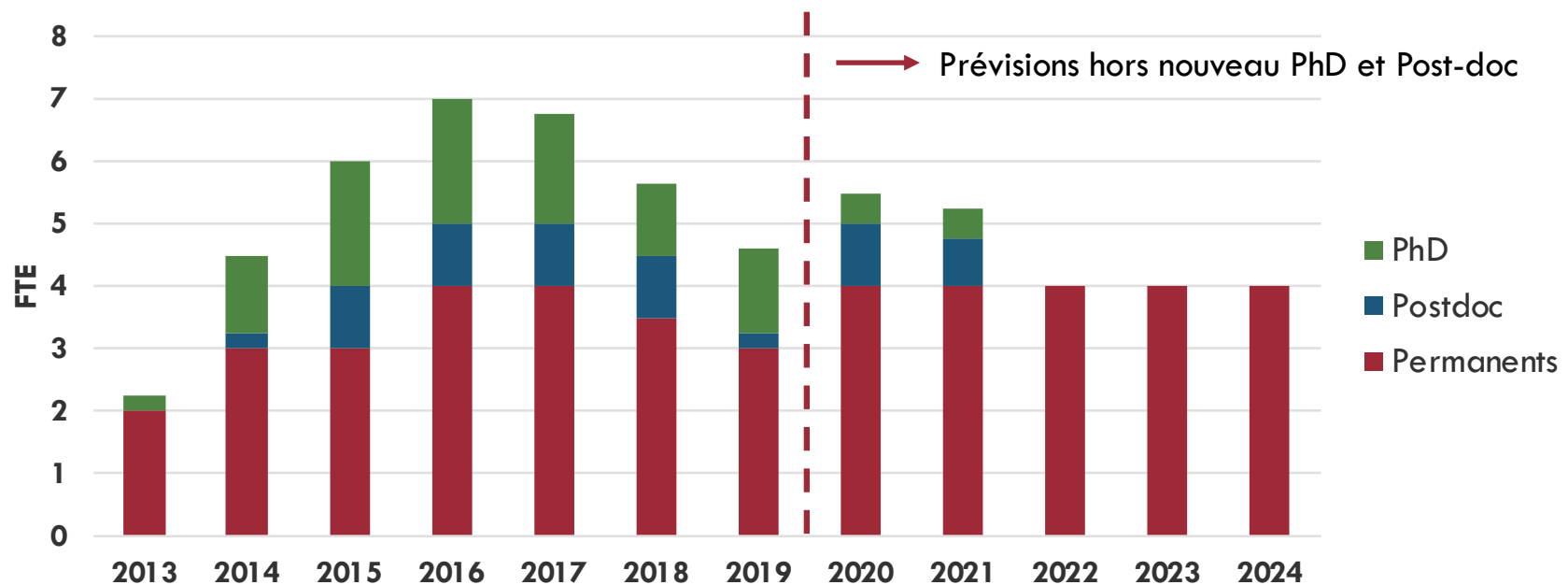
- ▶ **Permanents**
 - ▶ **Serge Kox** (DR) en 2018
 - ▶ retraite en 2018
 - ▶ **François Montanet** (Pr) en 2017
 - ▶ 100% Auger à partir de 2017
- ▶ **Post-doctorants**
 - ▶ **Thomas Salagnac**
 - ▶ ENIGMASS 2018 sur STEREO
 - ▶ Postdoc sur RICOCHET à l'IP2I
 - ▶ **Victor Hélaine**
 - ▶ ENIGMASS 2014-17 sur STEREO
 - ▶ A quitté la recherche
- ▶ **Doctorants : 4 thèses soutenues**
 - ▶ **Laura Bernard** (2019 STEREO)
 - ▶ Postdoc au LLR sur Super-Kamiokande
 - ▶ **Thomas Salagnac** (2017 STEREO)
 - ▶ Postdoc à IP2I sur RICOCHET
 - ▶ **Félix Kandzia** (2017 STEREO)
 - ▶ Postdoc à ILL sur FIPS
 - ▶ **Stéphane Zsoldos** (2016 STEREO)
 - ▶ Postdoc à QMUL sur T2K et HK
- ▶ **10 stagiaires M1, M2 accueillis**

Arrivées

- ▶ **Permanents**
 - ▶ **Jean-Stéphane Ricol** à partir de 06/2019
 - ▶ avant dans groupe DARK sur LSST au LPSC
 - ▶ **Arnaud Robert** à partir de janvier 2020
 - ▶ avant au LPNHE sur LHCB
- ▶ **Post-doctorants**
 - ▶ **Mathieu Licciardi** à partir de 09/2019
 - ▶ Post-doc IN2P3 2 ans sur STEREO
- ▶ **Doctorant**
 - ▶ **Mathieu Vialat** en 10/2018
 - ▶ 2018-2021 en codirection avec l'ILL

Evolution de l'équipe

- ▶ Nouvelle équipe créée en 2013 autour du projet STEREO
- ▶ L'équipe s'est renforcée et a pérennisé son activité dans la physique des neutrinos
 - ▶ Stabilité du nombre de permanents en terme de FTE : ~ 4
 - ▶ Stabilité du nombre de doctorant et post-doctorant : ~ 2.5 FTE
en moyenne 1 à 2 PhD + 1 postdoc par an



Thèmes de recherche : physique des Neutrinos

- ▶ **Avancées majeures en physique des neutrinos ces 20 dernières années,**
 - ▶ Mise en évidence des oscillations
 - ▶ La *masse des neutrinos* est le premier signe observé de nouvelle physique au-delà du MS
- ▶ **Encore des questions ouvertes en physique des neutrinos (non exhaustif)**
 - ▶ **Existe-t-il plus de 3 neutrinos ? Quelle est l'origine des anomalies observées ?**
 - ▶ Certaines données expérimentales suggèrent l'existence de neutrino(s) stérile(s) de masse $\sim 1\text{eV}$
 - ▶ Test de l'anomalie des neutrinos de réacteur (RAA) par des oscillations à très courte distance
 - ▶ **Existe-t-il des interactions non-standard susceptibles d'affecter leurs oscillations ?**
 - ▶ Test de nouvelle physique grâce à la diffusion cohérente des neutrinos de basse énergie
 - ▶ **La symétrie CP est-elle violée dans le secteur des leptons ?**
 - ▶ A-t-on $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$ dans le vide ? Nécessaire pour la leptogénèse
 - ▶ Expérience faisceau à très grande distance car δ_{CP} intervient dans les termes d'oscillation sous-dominants
 - ▶ Etude des oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ et $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$
 - ▶ **Quelle est la hiérarchie de masse ? $\Delta m_{23} > 0$ et $\Delta m_{23} < 0$**
 - ▶ Expérience à grande distance car la HM est sensible aux effets de matière sur les oscillations
 - ▶ **Le mélange leptonique reflète-t-il une symétrie sous-jacente ? l'angle θ_{23} est-il maximal ?**

Thèmes de recherche : physique des Neutrinos

- ▶ **Avancées majeures en physique des neutrinos ces 20 dernières années,**
 - ▶ Mise en évidence des oscillations
 - ▶ La *masse des neutrinos* est le premier signe observé de nouvelle physique au-delà du MS
- ▶ **Encore des questions ouvertes en physique des neutrinos (non exhaustif)**

STEREO

▶ **Existe-t-il plus de 3 neutrinos ? Quelle est l'origine des anomalies observées ?**

- ▶ Certaines données expérimentales suggèrent l'existence de neutrino(s) stérile(s) de masse $\sim 1\text{eV}$
- ▶ Test de l'anomalie des neutrinos de réacteur (RAA) par des oscillations à très courte distance

RICOCHET

▶ **Existe-t-il des interactions non-standard susceptibles d'affecter leurs oscillations ?**

- ▶ Test de nouvelle physique grâce à la diffusion cohérente des neutrinos de basse énergie

DUNE

▶ **La symétrie CP est-elle violée dans le secteur des leptons ?**

- ▶ A-t-on $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$ dans le vide ? Nécessaire pour la leptogénèse
- ▶ Expérience faisceau à très grande distance car δ_{CP} intervient dans les termes d'oscillation sous-dominants
- ▶ Etude des oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ et $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

▶ **Quelle est la hiérarchie de masse ? $\Delta m_{23} > 0$ et $\Delta m_{23} < 0$**

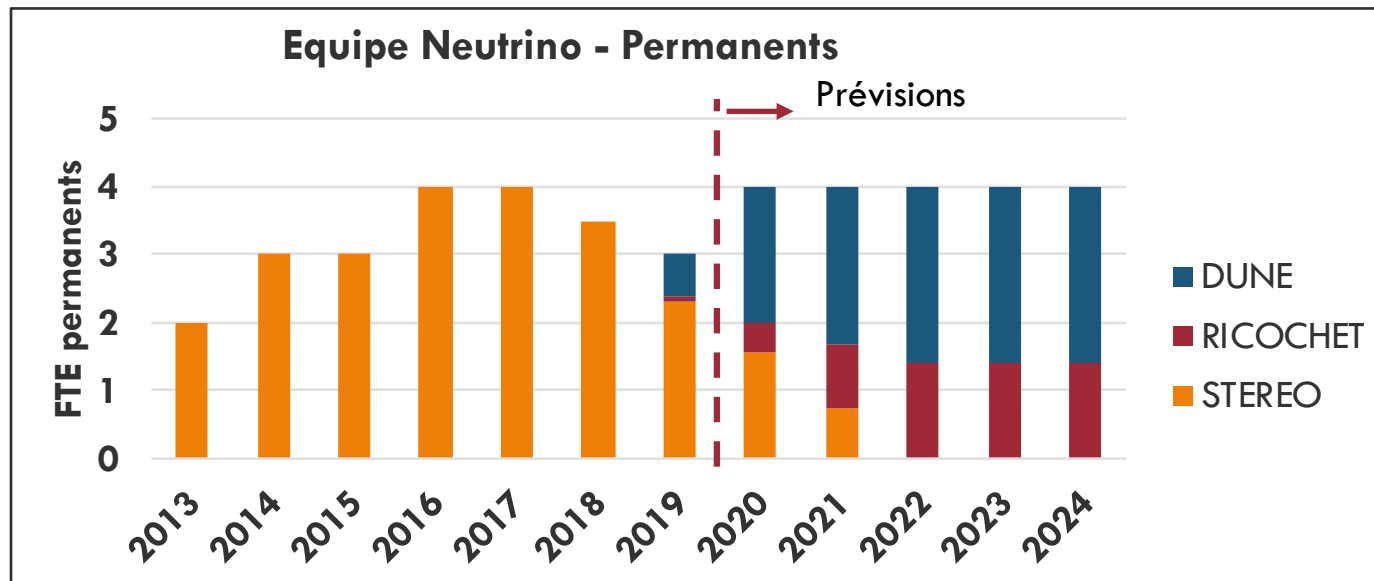
- ▶ Expérience à grande distance car la HM est sensible aux effets de matière sur les oscillations

▶ **Le mélange leptonique reflète-t-il une symétrie sous-jacente ? l'angle θ_{23} est-il maximal ?**

Organisation de l'équipe

- ▶ **Responsable d'équipe** : A. Stutz
 - ▶ Lien avec les instances du laboratoire, direction, administration
 - ▶ Animation de groupe : 1 réunion/semaine
- ▶ **Responsable projet STEREO** : A. Stutz
 - ▶ J. Lamblin, M. Licciardi, J.S. Réal, J.S. Ricol, A. Stutz
- ▶ **Responsable projet RICOCHET** : J. Lamblin
 - ▶ J. Lamblin, J.S. Réal, A. Stutz
- ▶ **Responsable projet DUNE** : J.S. Réal
 - ▶ J.S. Réal, J.S. Ricol, (A. Robert à partir de 01/2020)

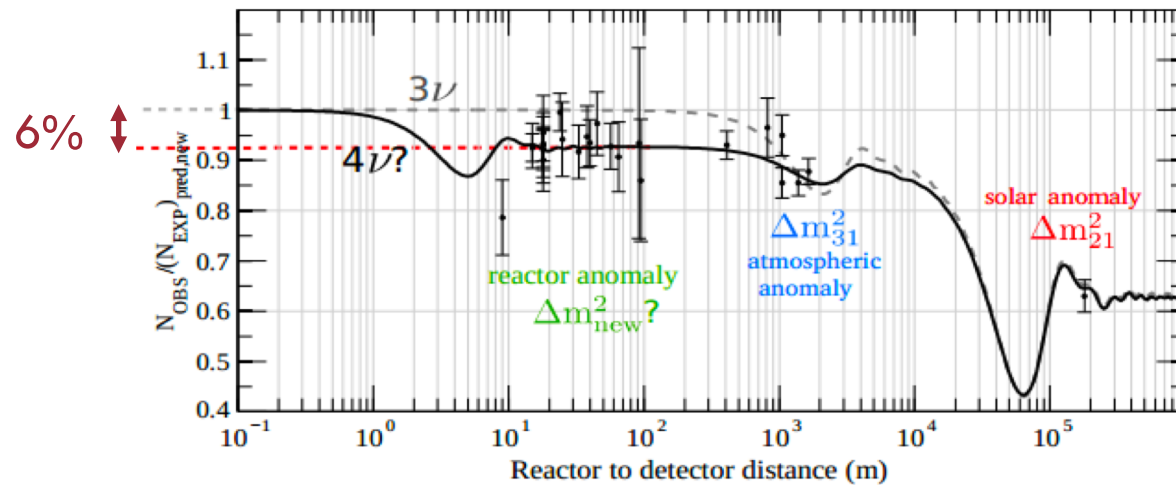
L'implication dans RICOCHET et DUNE sera examinée lors du CS du LPSC le 16 janvier 2020



Contexte de STEREO : RAA

► Anomalie des neutrinos de réacteur (RAA)

- Déficit de neutrinos observé à courte distance $\sim 6\%$
- Confirmé par des expériences Daya-Bay, Reno, Double Chooz



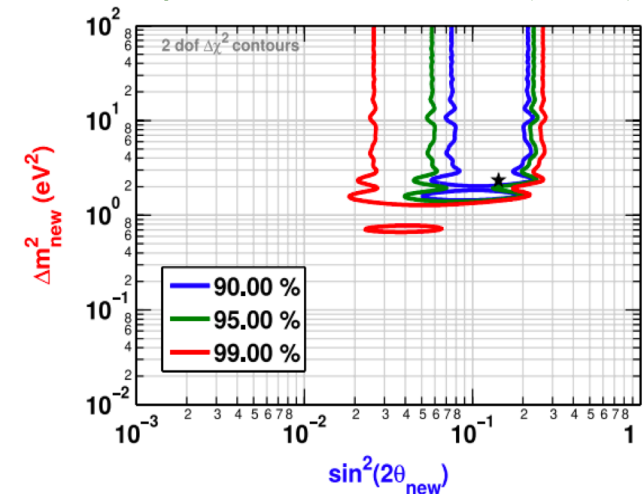
► Hypothèse d'un neutrino stérile $\sim 1 \text{ eV}^2$?

- Modèle à 2 saveurs :

$$P_{\text{survie}}(L, E) = 1 - \sin^2(2\theta_{\text{new}}) \times \sin^2\left(1.27 \cdot \Delta m_{\text{new}}^2 \cdot \frac{L}{E}\right)$$

► Mauvaise prédiction des flux émis ?

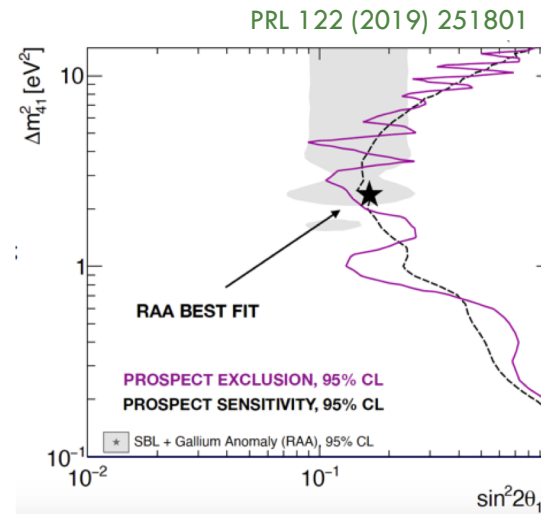
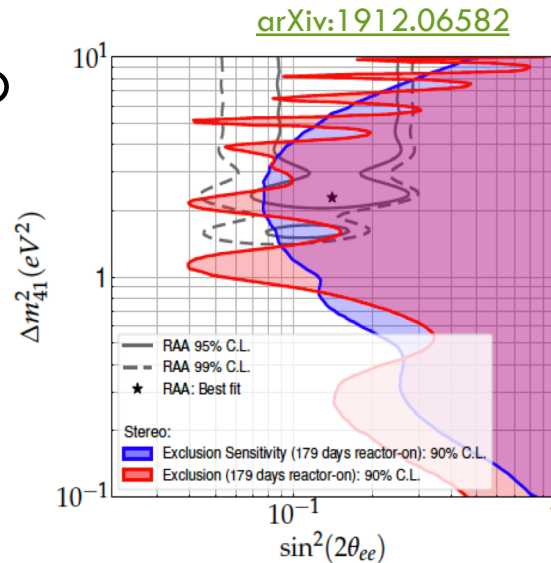
Phys. Rev. D 83, 073006 (2011)



RAA et oscillation de neutrino

- ▶ Très forte concurrence internationale avec des premiers résultats excluant une grande partie de la zone des paramètres autorisée par la RAA (2011)

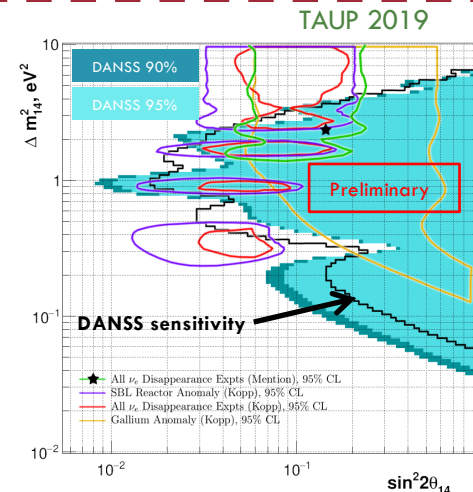
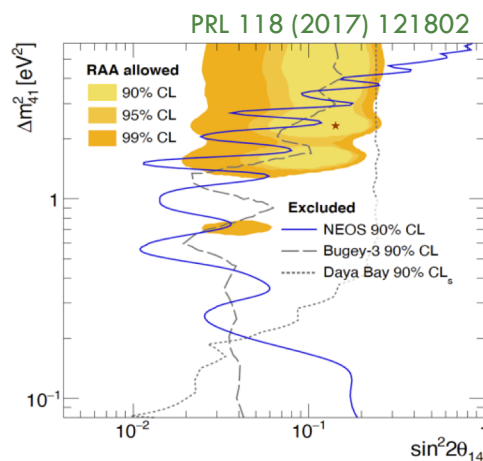
STEREO
LS-Gd



PROSPECT
LS-Li

Réacteurs de
recherche
pur ²³⁵U

NEOS
LS-Gd



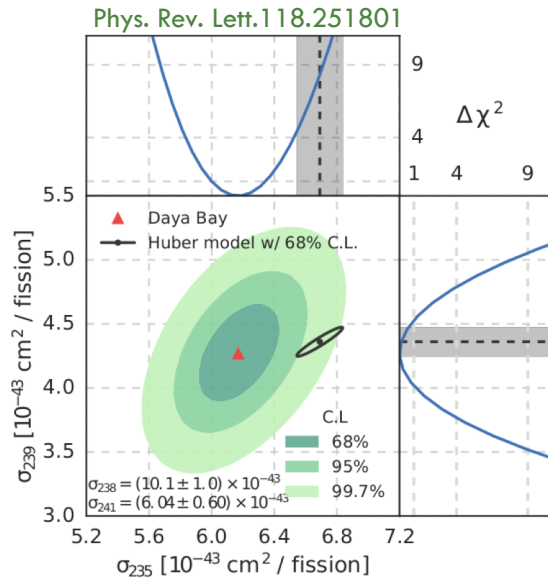
DANSS
PS-Gd

Réacteurs
commerciaux
²³⁵U + ²³⁹Pu

RAA et prédiction du flux

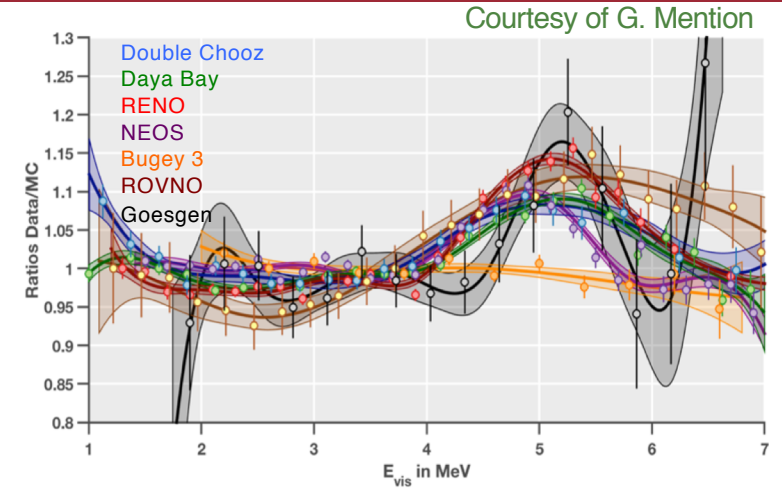
► Forme du spectre

- Excès d'événements autour de 5 MeV « bump »
- Ne peut être expliqué par une oscillation
- Ne peut expliquer le déficit global



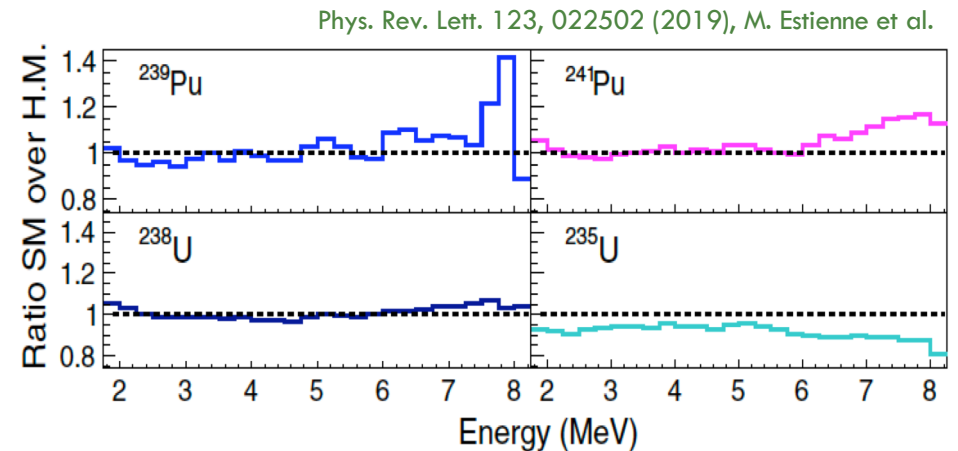
► Nouveau modèle de flux SM-2019

- Déficit de Daya-Bay réduit à ~2%
- L'essentiel du déficit dû à l' ^{235}U
- N'explique pas le bump@5MeV



► Mesure absolue du flux

- Evolution du combustible des réacteurs commerciaux
 - Daya Bay + RENO
- Le déficit serait dû uniquement à l' ^{235}U



STEREO

► STEREO est une expérience de précision pour :



► Test de l'oscillation **indépendamment de la prédiction sur le flux**

► Mesure du **flux absolu et du spectre d' ^{235}U** pur pour démêler le rôle des principaux isotopes fissiles U5 & Pu9

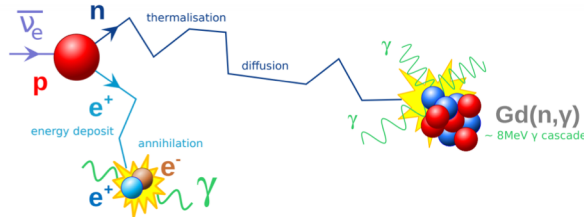
► Collaboration franco-allemande : CEA-Irfu, ILL, LAPP, LPSC, MPIK-Heidelberg



L'expérience STEREO

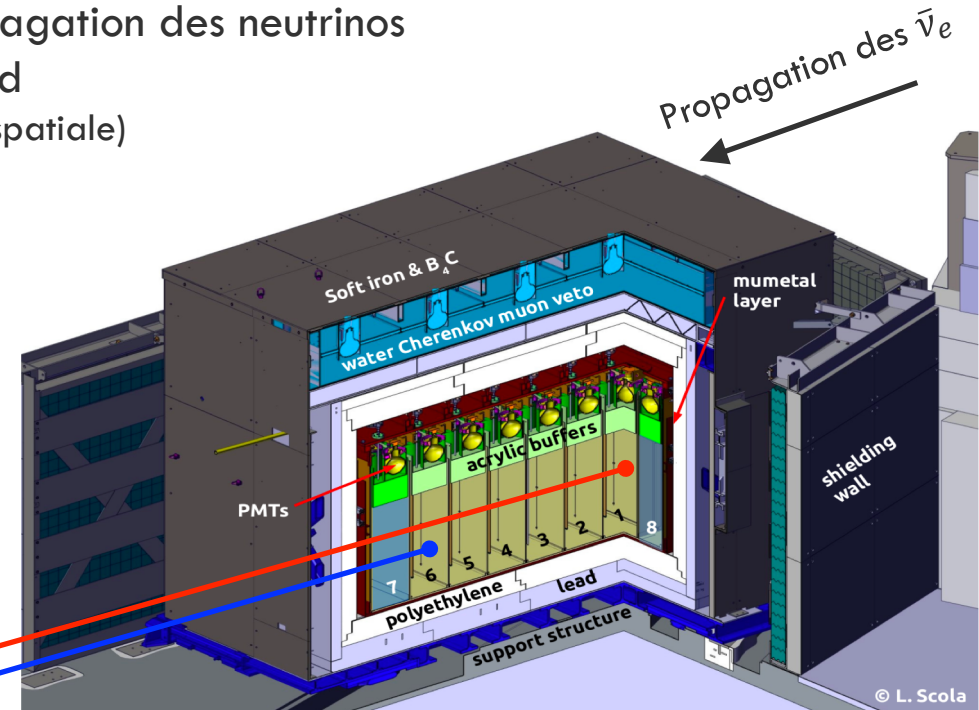
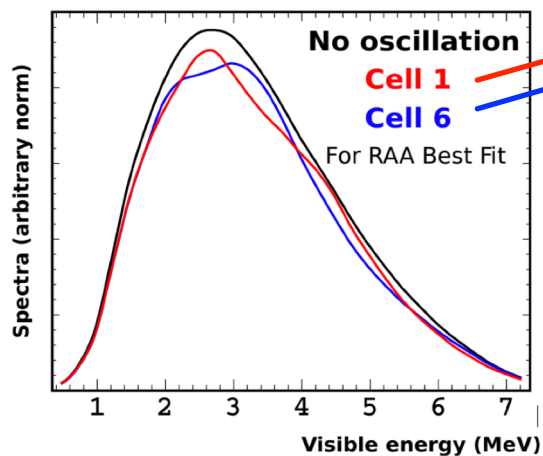
► Détecteur segmenté + technologie éprouvée

- 6 cellules identiques dans l'axe de propagation des neutrinos
- IBD dans scintillateur liquide dopé au Gd
 - $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ (coïnc temporelle et spatiale)



► Oscillations

- Mesure des distorsions relatives du spectre en énergie des $\bar{\nu}_e$ entre cellules
- Mesure indépendante du spectre prédit



► Mesure du spectre de l' ^{235}U

- Très bonne maîtrise de l'échelle d'énergie
- Maîtrise de l'efficacité absolue de détection
- Contrôle de la puissance du réacteur

Responsabilités techniques du LPSC

▶ Très grande visibilité de l'équipe et des services techniques

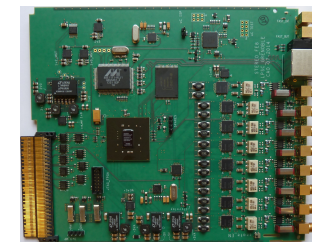
▶ Construction et caractérisation :

- ▶ Détecteur veto muon (Cerenkov à eau)
 - ▶ Service Détecteur Instrumentation (SDI)+ physiciens *Thèse de S. Zsoldos*
- ▶ Electronique et acquisition de données : bases des PMTs, Cartes Front-end, trigger, contrôle LED
 - ▶ Service Electronique + physiciens *Thèse de T. Salagnac*
- ▶ Contrôle lent et monitoring
 - ▶ physiciens
- ▶ Système de calibration/injection de lumière avec LED
 - ▶ SDI + Service Electronique + physiciens
- ▶ Blindage mu-métal et polyéthylène
 - ▶ SDI

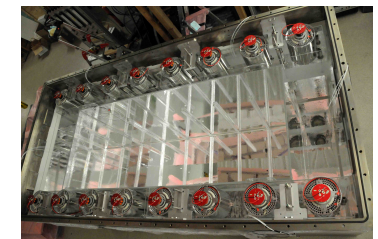


Détecteur veto muon

JINST 11 C02078



Carte FE 8 voies



Intégration du Détecteur interne au LPSC

▶ Intégration des différents éléments du détecteur interne au LPSC

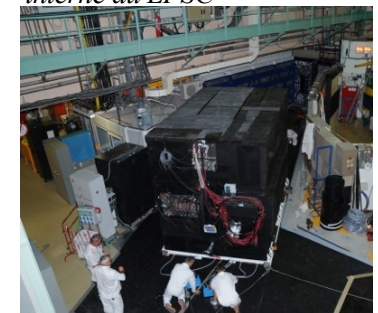
- ▶ + tests avant transport à l'ILL
 - ▶ SDI + physiciens

▶ Installation et maintenance/réparation sur site

- ▶ Responsabilité A. Stutz
- ▶ Très fortes implications SDI + physiciens



Insertion du détecteur interne dans ses blindages



Déplacement des 96 t de STEREO de la zone de montage à la zone expérimentale

Responsabilités prise de données et analyse

▶ Très grande visibilité de l'équipe et des services techniques

▶ Prise de données

- ▶ Coordination de la prise de données depuis le début de l'expérience
- ▶ Astreinte 24h/24h Tél shift
- ▶ Calibrations internes (1X semaine)
- ▶ Expertise DAQ et monitoring
- ▶ Transfert des données au CCIN2P3 avec prétraitement au LPSC
- ▶ **Soutien du service informatique pour**
 - ▶ Hébergement du site web au LPSC
 - ▶ Maintenance des machines de prétraitement et transfert des données
 - ▶ ELOG, Wiki ...

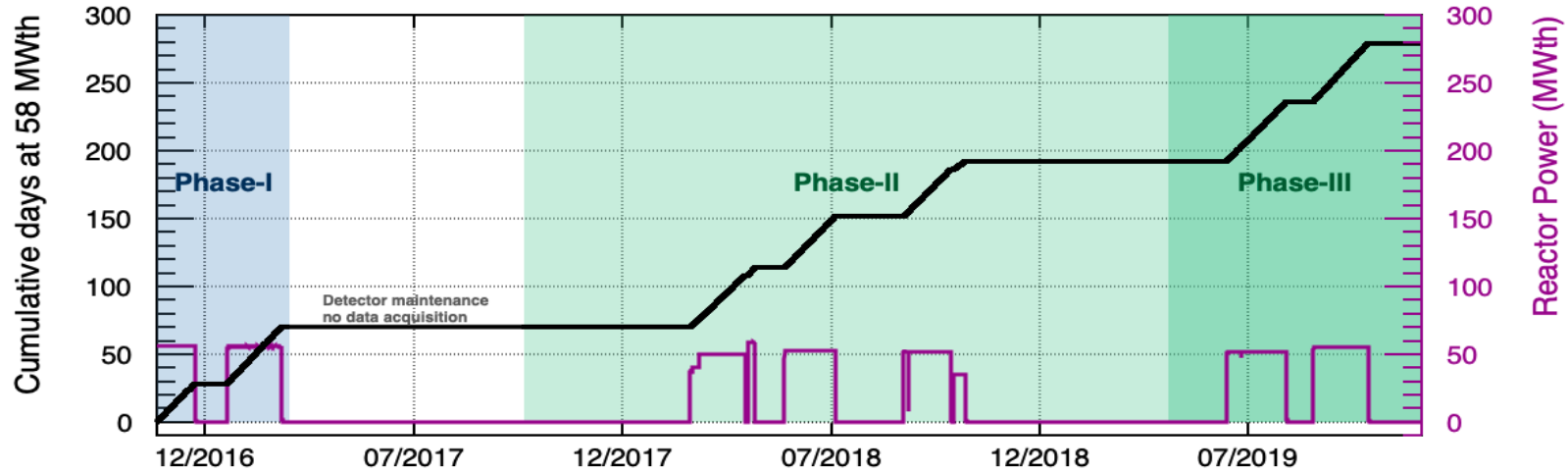
▶ Analyse de données

- ▶ Echelle d'énergie
 - ▶ *Thèses de F. Kandzia + M. Vialat*
- ▶ Sélection des événements
 - ▶ *Thèses de T. Salagnac + L. Bernard*
- ▶ Modélisation du bruit de fond
 - ▶ *Thèse de L. Bernard*
- ▶ Extraction du signal neutrino
 - ▶ *Thèse de L. Bernard*
- ▶ Simulation MC
 - ▶ *Thèse de T. Salagnac*
- ▶ Analyses statistiques en terme d'oscillation
 - ▶ *Thèse de T. Salagnac + M. Vialat*
- ▶ Analyses statistiques forme du spectre
 - ▶ *Thèse de L. Bernard*
- ▶ Analyses combinées avec PROSPECT
 - ▶ *Travail actuel de M. Licciardi*

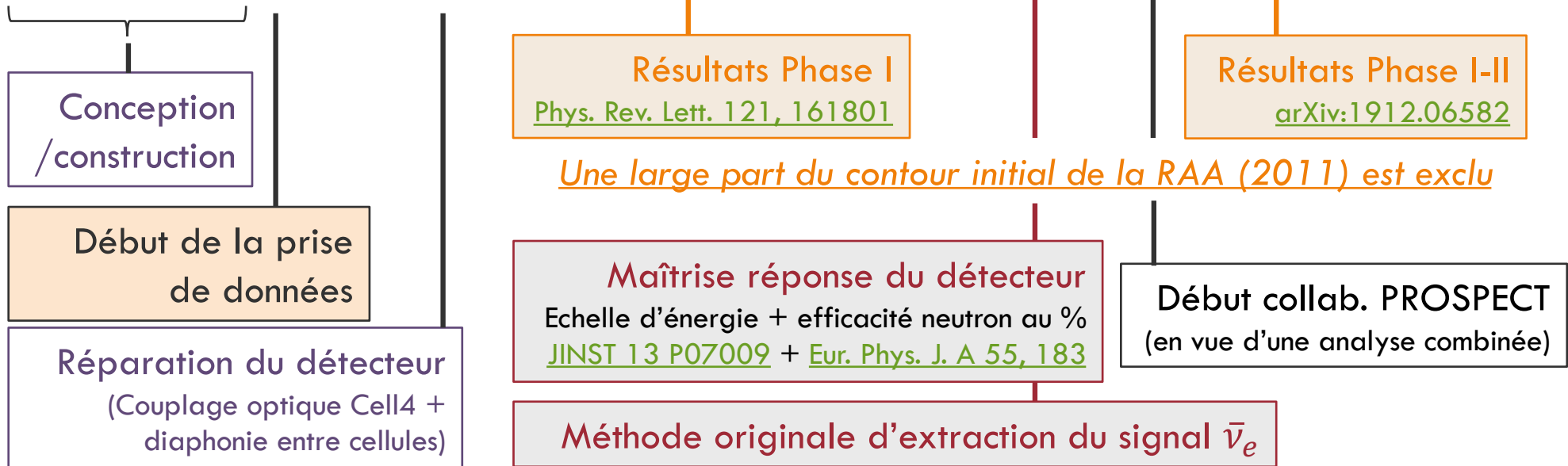
Faits marquants

► Plus de $100 \text{ k}\bar{\nu}_e$ détectés + mesure précise du bruit de fond réacteur arrêté

- Efficacité de la prise de données $\sim 100\%$ dont 98.5% pour runs neutrinos



2013



Projet scientifique futur : STEREO

► STEREO

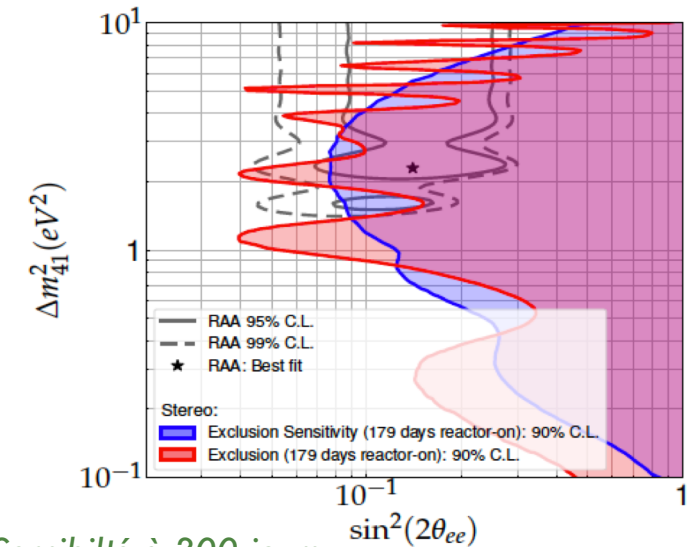
- Prise de données jusque mi-2020 (+ 2 cycles)
- Démontage début 2021
- Exploitation des données jusqu'en 2021

- Prochainement, résultats intermédiaires sur
 - Flux absolu de $l^{235}\text{U}$
 - Nouveau spectre de référence de $l^{235}\text{U}$
 - Analyse commune avec PROSPECT

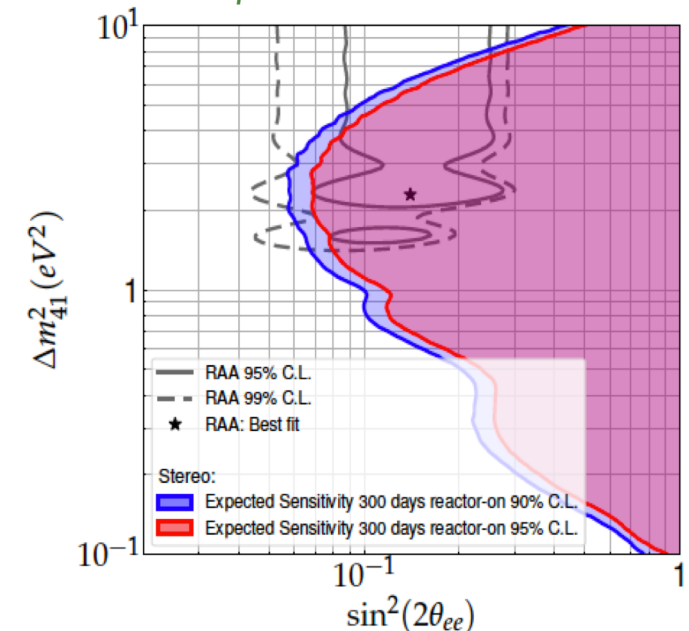
- Analyse finale avec plus de 300 jrs de données
 - Oscillation
 - Flux absolu de $l^{235}\text{U}$
 - Nouveau spectre de référence de $l^{235}\text{U}$

 - Analyse combinée avec PROSPECT, SoLid,...

[arXiv:1912.06582](https://arxiv.org/abs/1912.06582) soumis à PRD



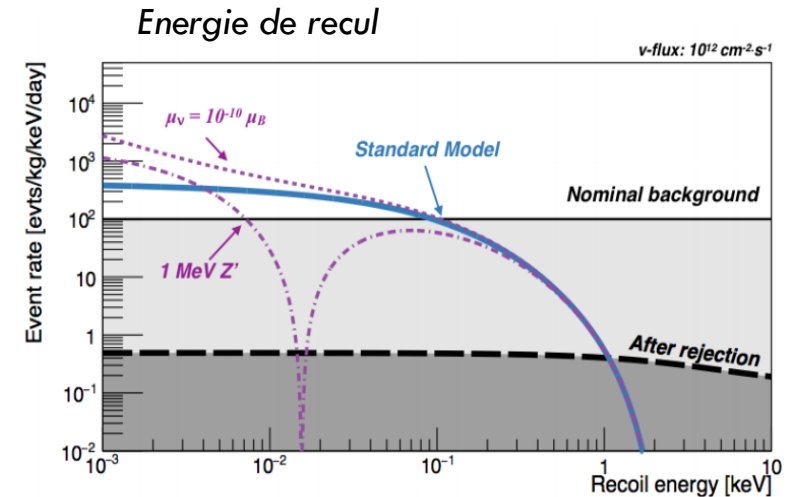
Sensibilité à 300 jours



Projet scientifique futur : RICOCHET

► Diffusion cohérente de neutrinos (CENNS)

- Prédite par le Modèle Standard depuis 1974
- Observée pour la première fois par COHERENT en 2017
- Section efficace dominante à basse énergie
- Processus unique pour tester le Modèle Standard à basse énergie
- **MAIS produit des reculs de très faible énergie**

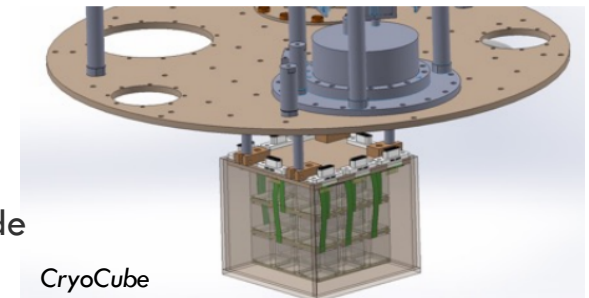


► Nombreux projets sont en cours à travers le monde auprès de réacteur :

- NuGEN, CONUS, TEXONO, Connie, RED100
- MINER, NU-CLEUS, BASKET, BULLKID, RICOCHET ← Sub-100 eV

► RICOCHET

- **Expérience à l'échelle du kg avec seuil de $O(10)$ eV @ I'ILL**
- Développement de 2 réseaux de bolomètres
 - CryoCube (ERC J. Billard IP2I) 1kg de 30 g (Ge&Zn) identification de particules par chaleur et ionisation
 - Q-Array (USA)
- Collaboration USA, Russie, France
- Synergie locale avec ILL et Institut Néel (Grenoble) et IP2I (Lyon)



Projet scientifique futur : RICOCHET

▶ RICOCHET

- ▶ Construction et exploitation de RICOCHET
- ▶ Dans l'immédiat : réponse à l'appel à projet de l'ILL pour utilisation du site de STEREO à la suite de STEREO
- ▶ Finalisation du TDR en 2021
- ▶ Début de la prise de données en 2023, premiers résultats en 2024
- ▶ Nos contributions :
 - ▶ Electronique chaude et acquisition de données en collaboration avec IP2I et I. Néel
 - ▶ Blindage et veto muon
 - ▶ Intégration sur site en collaboration avec l'ILL
- ▶ Pré-projet ANR soumis pour financement, porteur J. Lamblin

Projet scientifique futur : DUNE

► Expérience ultime pour la physique des neutrinos

- Etude des effets sous dominants des oscillations
 - Paramètres de la matrice PMNS
 - Violation CP accessible uniquement avec les expériences d'apparition $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ et $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$
 - Hiérarchie de masse (effet de matière)
- Mais aussi pour neutrinos atmosphériques, décroissance du proton, supernova, ...



4 modules de détection de 10 kt LAr
Lecture simple et **double phase**

Détecteur proche de
haute précision

Faisceau pur de 2.5 GeV
1.2 à 2.4 MW

Projet scientifique futur : DUNE

▶ DUNE

- ▶ Exploitation des données de DUNE à long terme
 - ▶ Matrice PMNS (violation δCP , angle θ_{23}), hiérarchie de masse
- ▶ Participation à l'analyse des données sur le prototype double phase en cosmique puis en faisceau à partir de 2021
 - ▶ Acquisition de l'expertise TPC pour reconstruction des traces pour l'identification des neutrinos et mesure de leur l'énergie
 - ▶ Trigger cosmique réalisé au LPSC vient d'être installé
- ▶ Finalisation du TDR Double Phase en 2020
- ▶ Données DUNE (Simple Phase) en cosmique à partir de 2023
- ▶ Données Double Phase à partir de 2024
- ▶ Données avec faisceau à partir de 2026

Conclusions

- ▶ **STEREO : Recherche de neutrinos stériles**
 - ▶ Prise de données jusque mi-2020 (2 cycles supplémentaires)
 - ▶ Démontage fin 2020
 - ▶ Exploitation des données jusqu'en 2021
- ▶ **RICOCHET : diffusion cohérente de neutrinos**
 - ▶ Construction et exploitation de RICOCHET
 - ▶ Début de la prise de données en 2023, premiers résultats en 2024
- ▶ **DUNE : mesures de précision en physique des neutrinos**
 - ▶ Exploitation des données de DUNE à long terme
 - ▶ Participation à l'analyse des données sur le prototype double phase
 - en cosmique puis en faisceau à partir de 2021
 - ▶ Données DUNE SP (DP) en cosmique à partir de 2023 (2024)
 - ▶ Données avec faisceau à partir de 2026