STEREO

Recherche de neutrinos stériles à l'échelle de l'eV

Anne Stutz pour la collaboration STEREO

Conseil scientifique de l'IN2P3 - 28 juin 2018

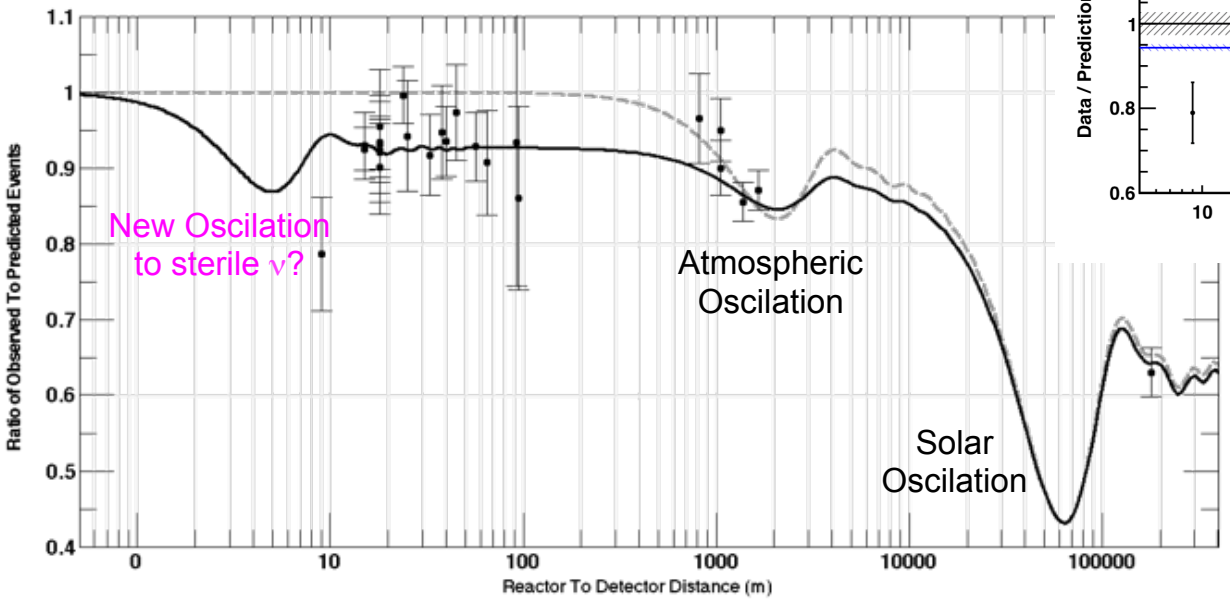
Anomalie des anti-neutrinos de Réacteur (RAA)

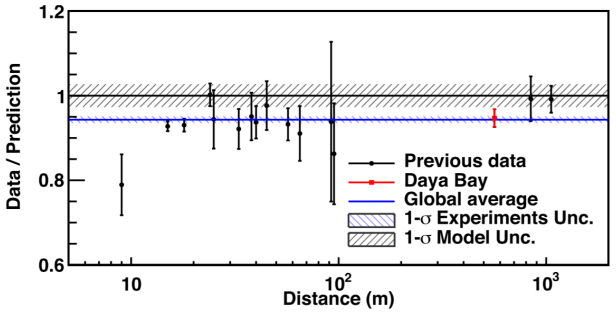
En 2011, la prédiction des spectres des neutrinos émis par les réacteurs a été révaluée

- Augmentation de la prédiction du flux d'anti-neutrinos de 3-5%

Les expériences à courte distance observent maintenant toutes un déficit ≈ 6% / prédictions

- Mauvaise prédiction des flux ?
- **Oscillation vers un nouveau neutrino stérile ~ 1eV^2 ?**





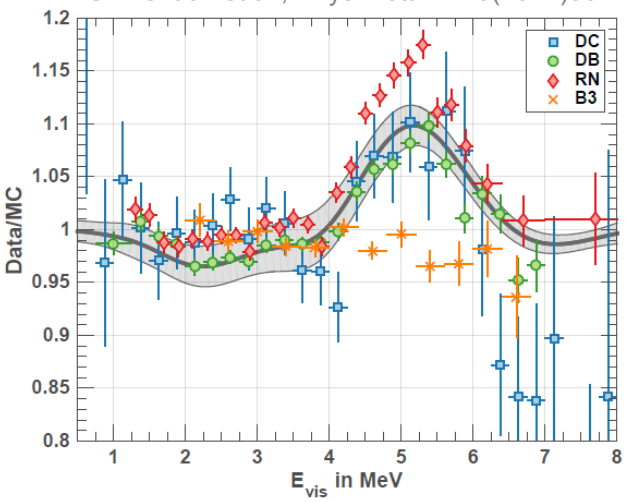
Le déficit a été confirmé par Daya-Bay en 2016, puis RENO et Double Chooz

Excès à 5 MeV

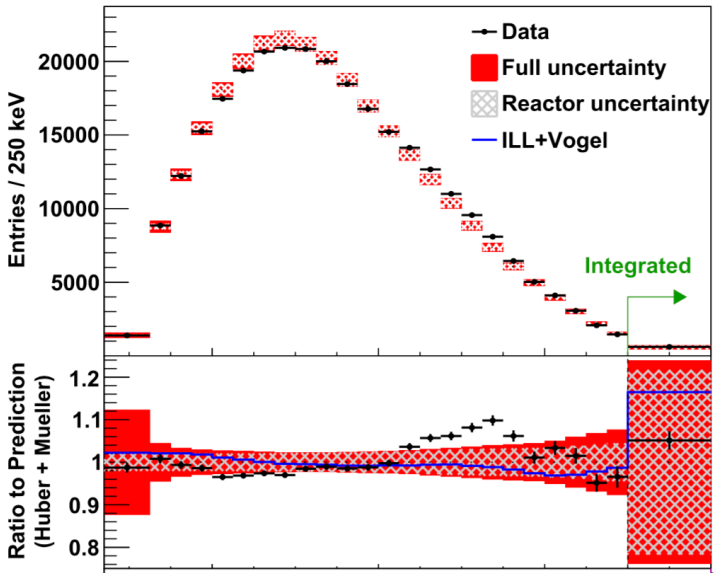
2014 : Un excès d'événements a été observé à 5 MeV par rapport aux prédictions

- Vu par toutes les expériences récentes (DB, RENO, DC, NEOS) mais pas par Bugey-3

G. Mention et al., Phys. Lett. B773(2017)307



CPC 41 (2017) arXiv:1607;05378



- Excès indépendant de L → pas imputable à une oscillation
- Corrélation avec la puissance → vient du réacteur

- Biais prédictions des spectes ?
- Biais expérimental?

Evolution isotopique du flux

Etude de l'évolution du flux de neutrinos en fonction du cycle du réacteur

- 4 chaines de fission : ^{235}U, ^{238}U ^{239}Pu et ^{241}Pu
- La composition du combustible évolue au cours d'un cycle

→ Flux/spectre des neutrinos évolue

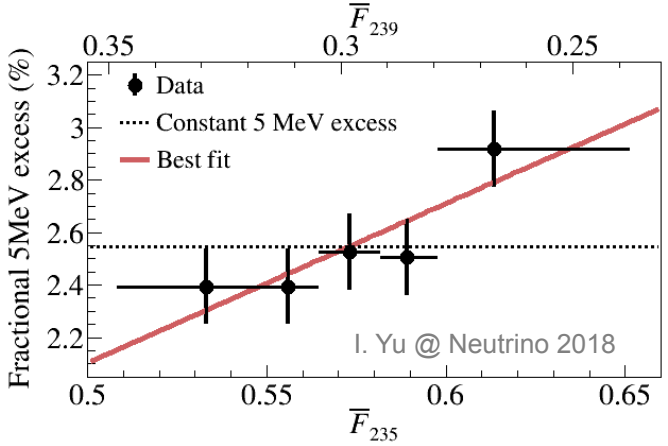
→ Section efficace par fission pour chaque isotope

Daya Bay et RENO : désaccord avec le modèle

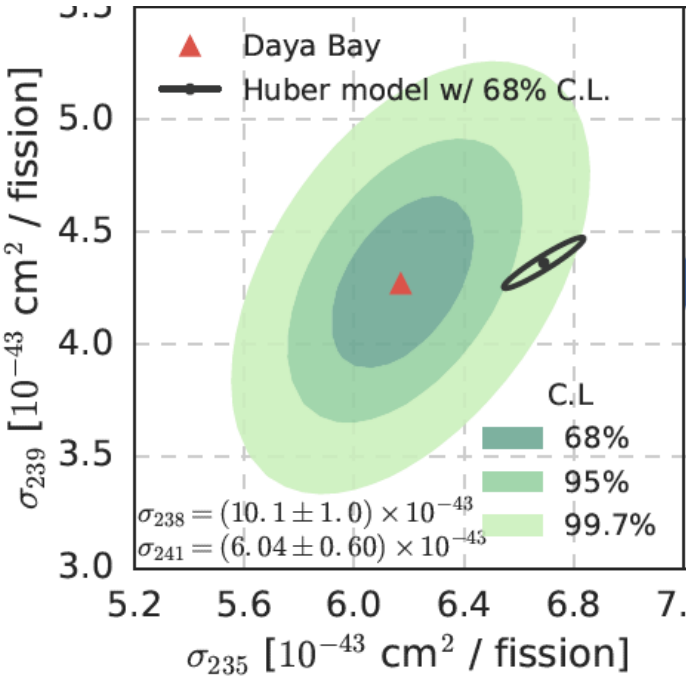
- Accord pour σ ^{239}Pu
- σ ^{235}U plus faible qu'attendue
- **Défavorise une oscillation vers un nouveau neutrino**

RENO :

corrélation entre l'excès à 5 MeV et la fraction d'^{235}U



Phys. Rev. Lett.118 (2017) 251801



NEOS et DANSS

Mesures à courte distance de réacteurs commerciaux

- Pth ~3 GW
- NEOS : 24 m
- DANSS : [10.7 ,12.7 m]

Comparaison relatives des spectres mesurés

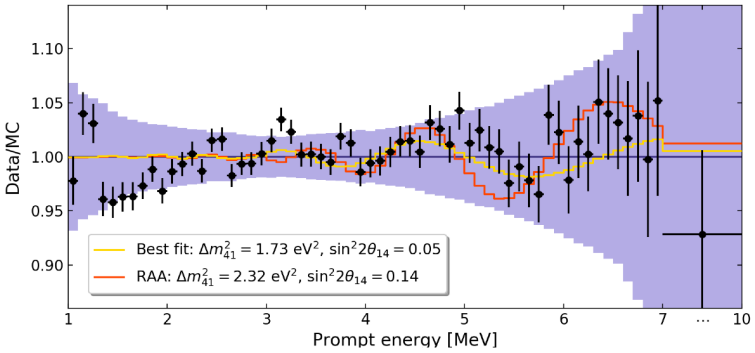
- **Insensibles à la normalisation et à la forme du flux**
- NEOS : relatif au spectre mesuré par DB
- DANSS : rapport 2 positions avec un même détecteur

Les 2 expériences observent des distorsions spectrales

- Préférences pour une oscillation vers un neutrino stérile
- Même zone de paramètres pour NEOS/DB et DANSS
- **Δm2 ≈ 1.3 eV^2, sin^{2}2θ≈0.05**

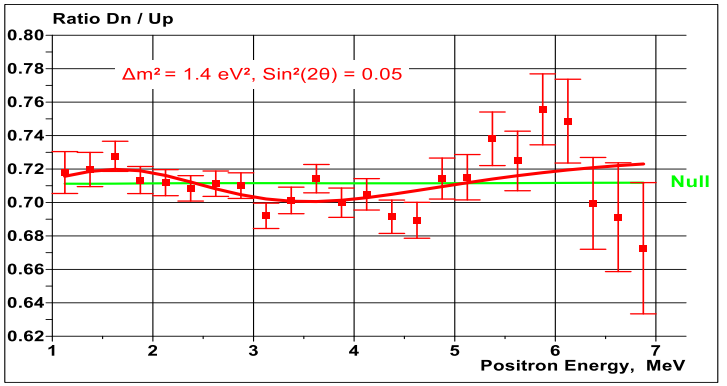
NEOS /DB

arXiv:1610.05134



Egorov @ Neutrino 2018

DANSS



Analyse globale: disparition des ν_e de réacteurs

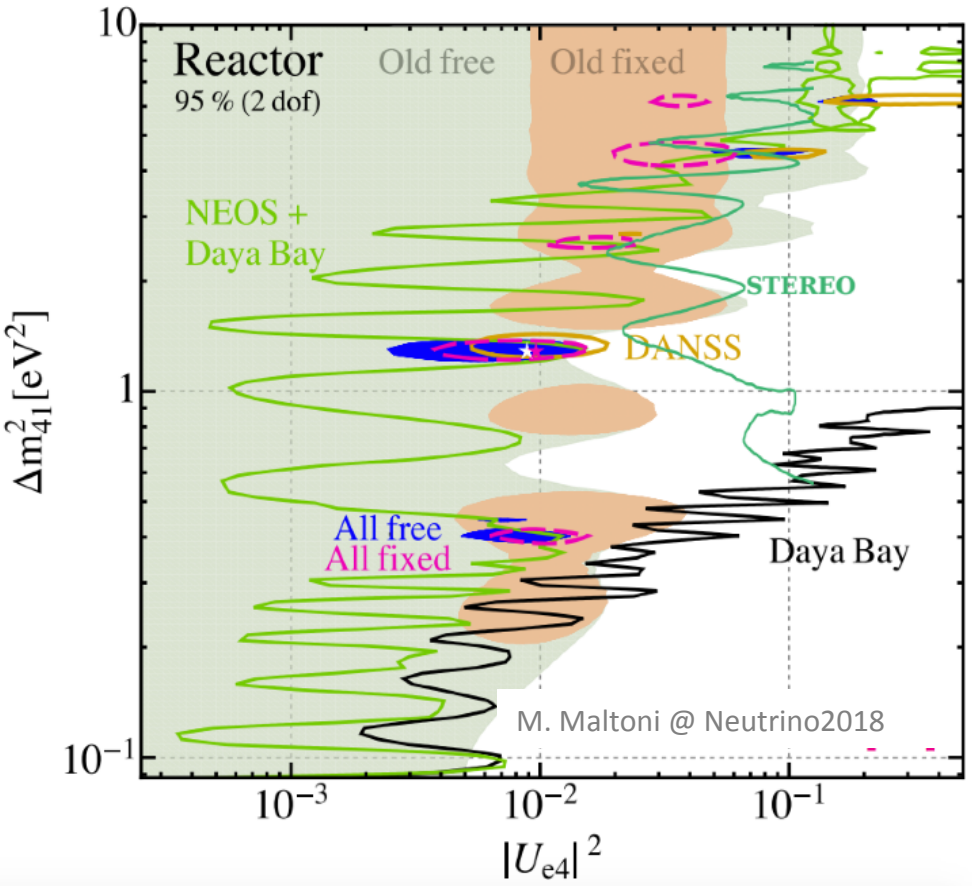
Résultats récents inclus :

- DANSS,
- NEOS/DB,
- DB (évolution du flux avec le combustible)

Deux modèles de normalisation des flux

- Fixé par le modèle (Hubert + Mueller)
- Libre pour chaque isotope

Forme : uniquement des rapports de spectres



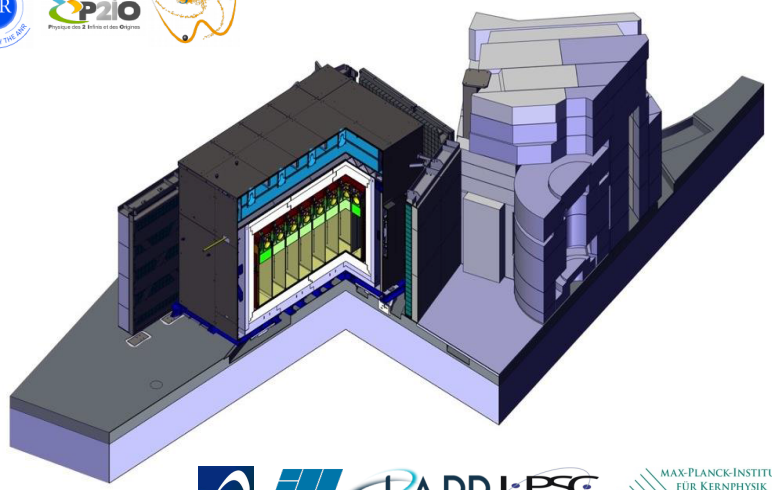
Indication d'une oscillation vers un neutrino stérile à l'échelle de l'eV

- Le fit est dominé par les résultats de DANSS + NEOS/DB
- Légère tension avec le RAA avec un modèle de flux-fixé, nécessite une révision des prédictions de l'^{235}U

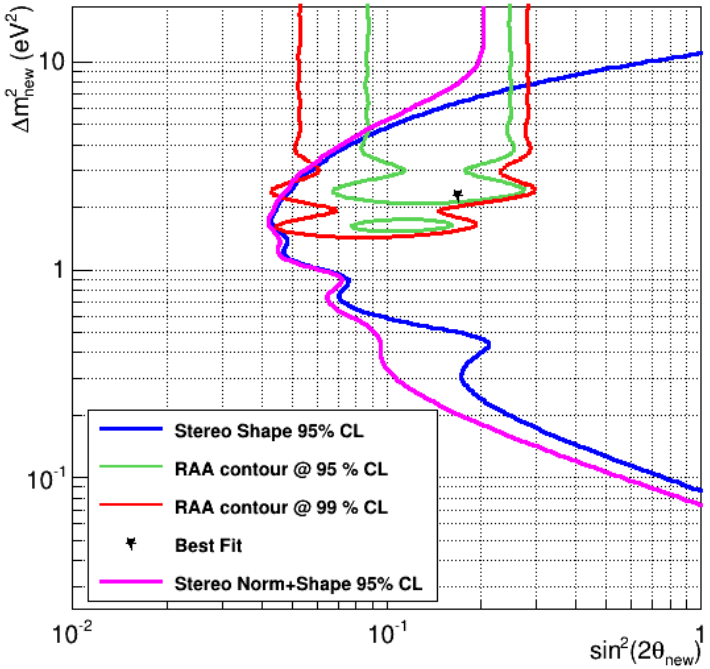
Pourra être testée prochainement par STEREO, PROSPECT et SoLid

STEREO : Objectifs physiques

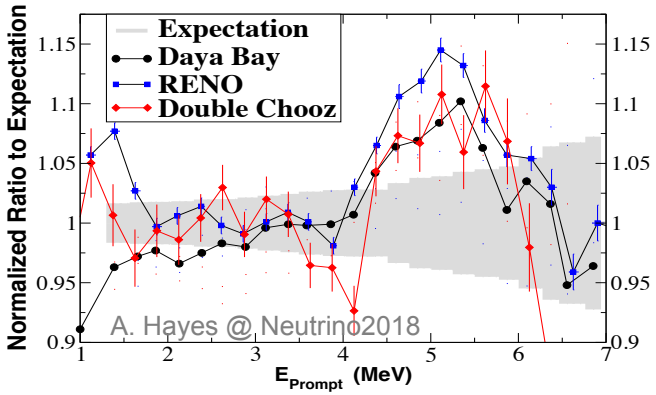
supported by



Test de l'anomalie des neutrinos de réacteur



Mesure du spectre du spectre d' ν_e de l' ^{235}U



Contour de sensibilité pour :

- 300 jours, 400 ve /jour
- Ep> 2 MeV
- Ed > 5 MeV
- δE=2%
- Systématiques incluses
- S/B = 1.5

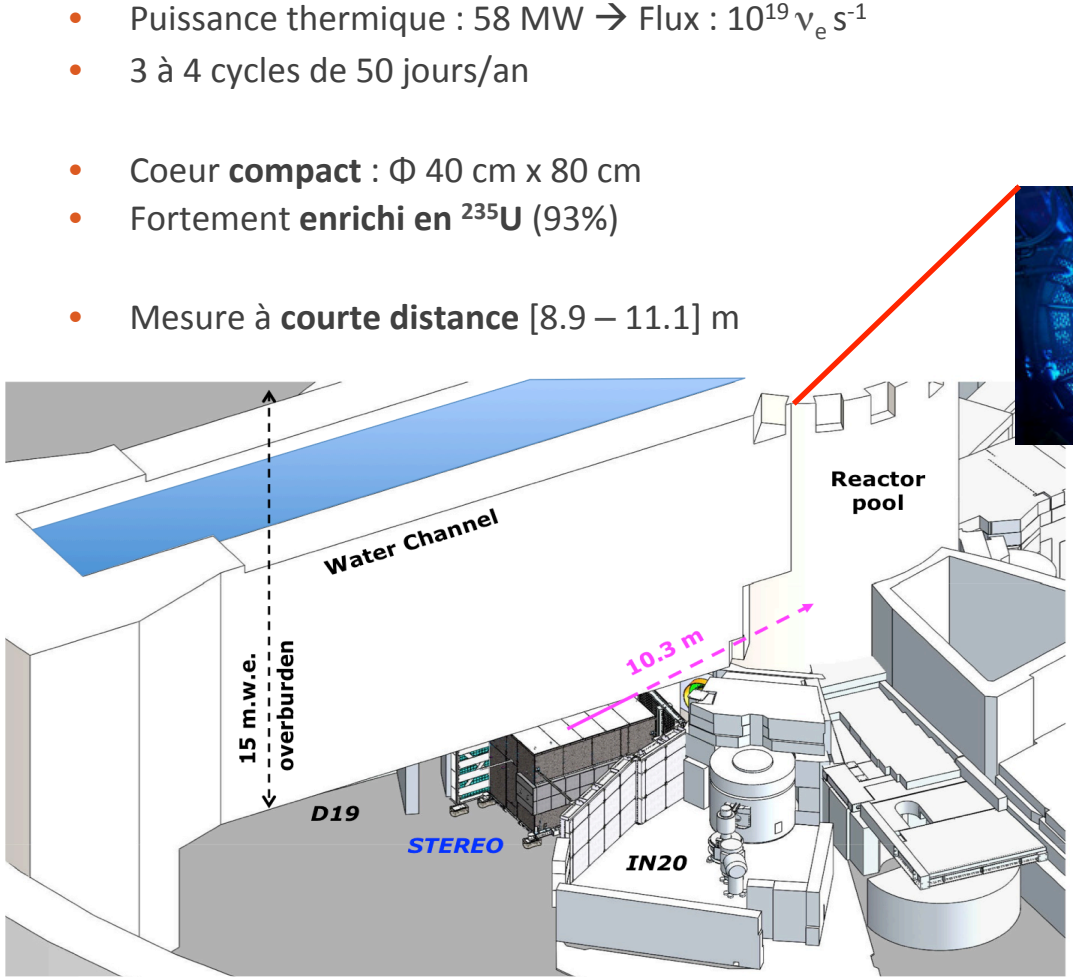
Le site de l'ILL

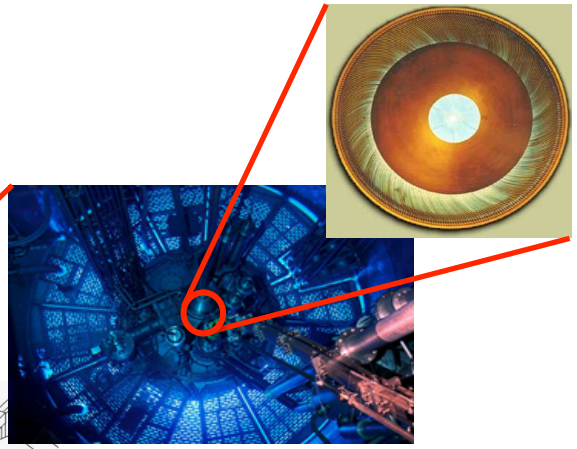
Réacteur de recherche

- Puissance thermique : 58 MW → Flux : $10^{19}\ \nu_e\ s^{-1}$
- 3 à 4 cycles de 50 jours/an

- Coeur **compact** : Φ 40 cm x 80 cm
- Fortement **enrichi en** ^{235}**U** (93%)

- Mesure à **courte distance** [8.9 – 11.1] m





Challenges

Rejection du bruit de fond

- Rayonnement cosmique (surface)
- ϒ et neutrons du réacteur et des expériences voisines

Présence d 'un champ magnétique

- dans la zone IN20 (15T qq jrs/an)

Installation nucléaire

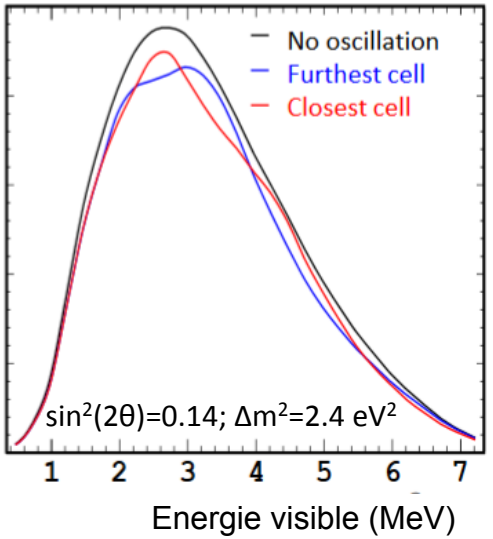
- Soumis à autorisation de l'ASN
- Sureté sismique et incendie
  → surcout et délai

Le détecteur STEREO arXiv:1804.09052

Mesure des distorsions relatives du spectre en énergie avec la distance

- Indépendant de la forme et de la norme du spectre source

$$P_{\nu_e \to \nu_e}\left(E_{\nu_e}, L\right) = 1 - \sin^2(2\theta)\sin^2\left(1.27\frac{\Delta m^2 L}{E_{\nu_e}}\right)$$



Détecteur segmenté + technologie éprouvée

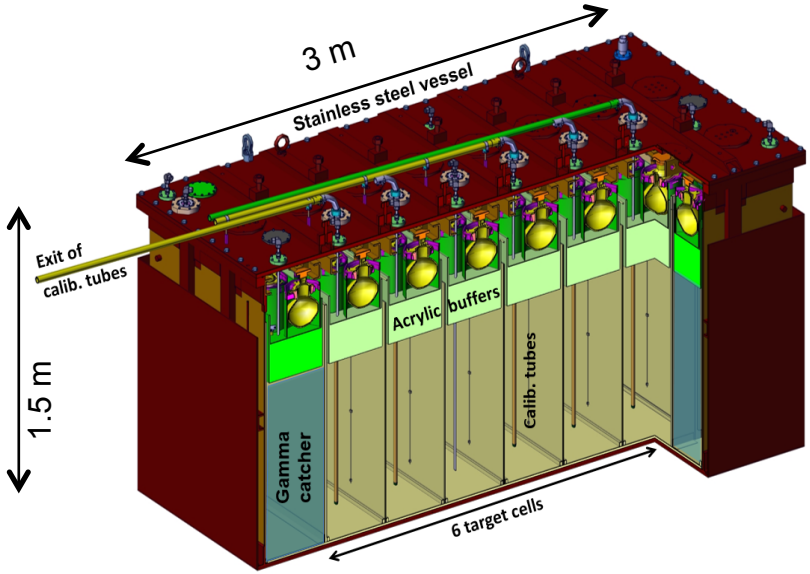
- **6 cellules identiques** dans l'axe de la propagation des neutrinos
- **IBD** dans scintillateur liquide dopé au Gd

$$\bar{\nu}_e + p \to e^+ + n$$

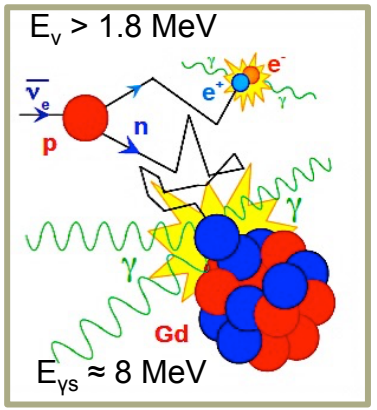
$$n + Gd \to Gd + \gamma s$$

$$e^+ + e^- \to \gamma\gamma$$

ΔT (prompt, retardé) ≈ 16 µs



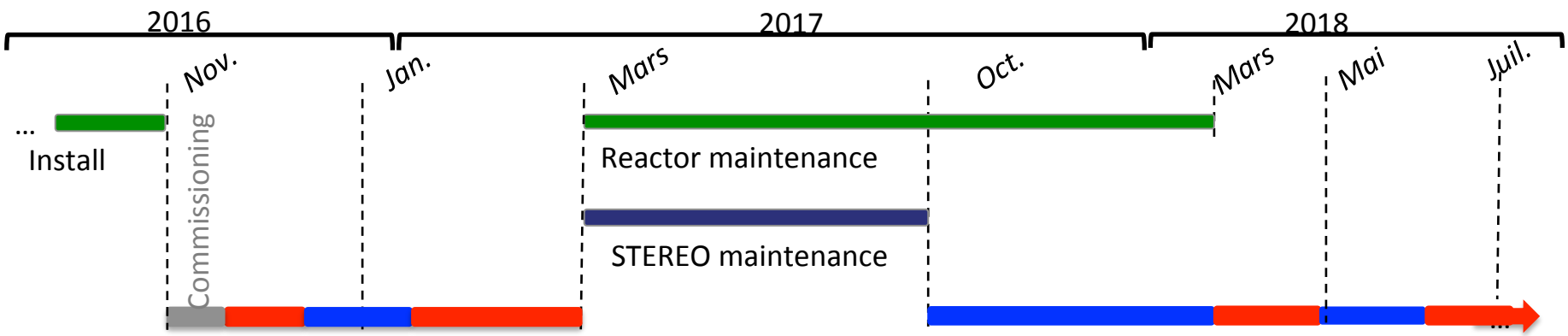
Buffers en acrylique de 20 cm pour homogénéiser la réponse du détecteur + couplage optique PMT bain d'huile minérale



Gamma catcher (LS non dopé)
Veto bruit de fond externe
Capture des fuites de gammas

Cible : 6 cellules identiques
LS dopé au Gd (0.2% en masse)
V_{tot}= 2.2 x 0.9 x 0.9 m³

Prise de données



Data taking – Phase I

ON : 66 jours effectifs

OFF : 25 jours effectifs

396 ± 5 ν_e détéctés/jour

Data taking – Phase II

Min : 3 cycles en 2018 + 3 cycles en 2019

ON : 300 jours → fin 2019

OFF : 400 jours → fin 2019

Les runs neutrino représentent 95% du temps

Efficacité prise de données ~ 100 %

Phase-I :

- **Perte de couplage optique** dans la cellule 4 et la partie avant du GC
- **Evolution de la diaphonie** optique entre cellules

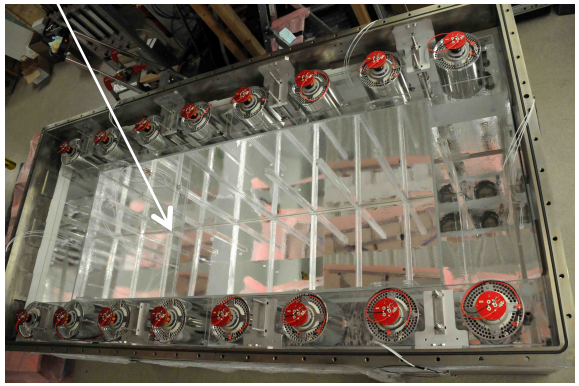
} → **Réparées durant l'été 2017**

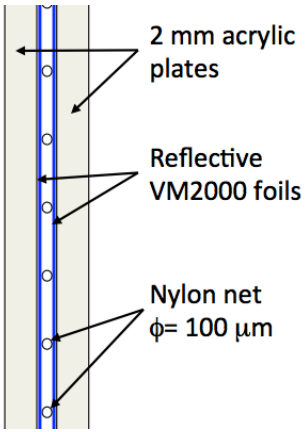
Phase-II :

- Détecteur stable et homogène

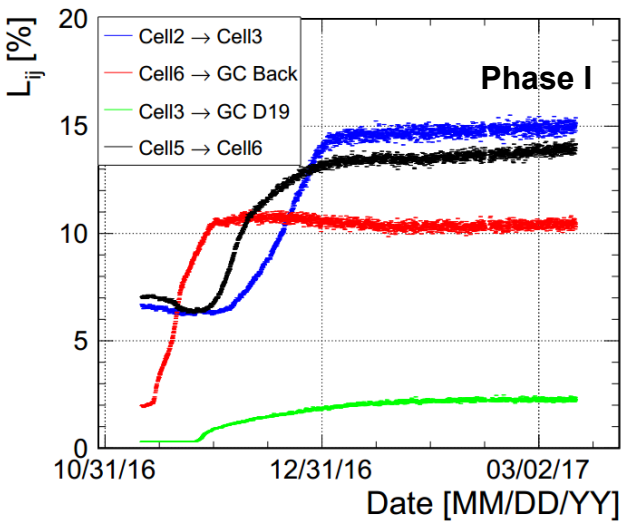
Maintenance du détecteur été 2017

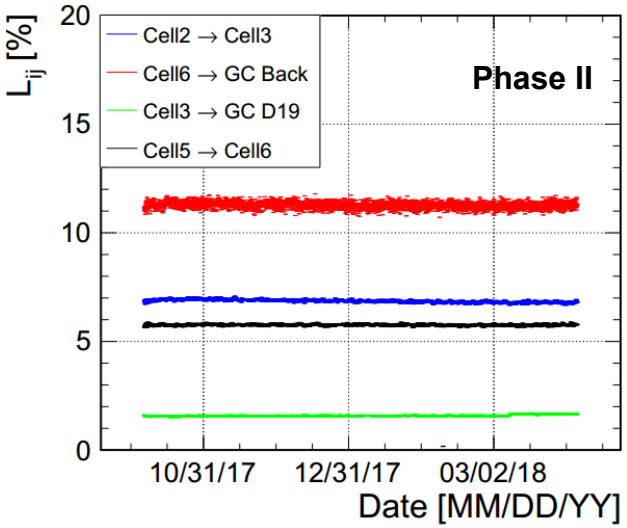
Réparation des buffers défectueux et des plaques de séparation entre cellules





Phase-II : détecteur stable et homogène





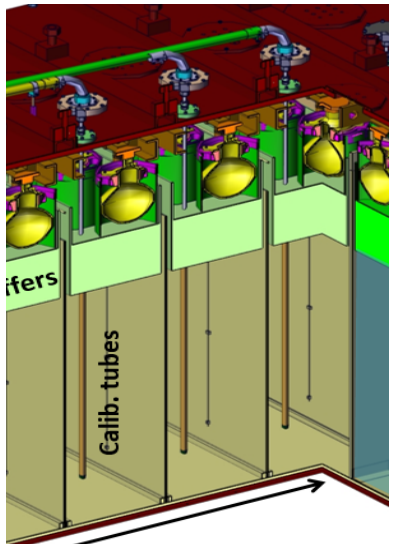
Dispositifs de calibration

Injection lumière LED + fibres optiques

- Calibration du gain des PMTs (pe fits) 1x/4h
- Linéarité de l'électronique (PMT + DAQ) < 1%

Calibration avec circulation de sources

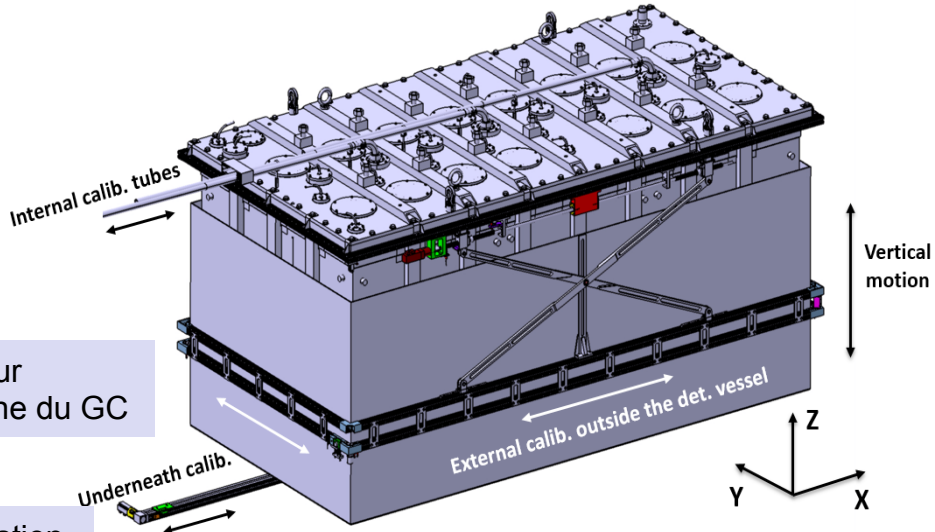
- 3 dispositifs : interne au centre des cellules, externe autour du détecteur et sous le détecteur
- Sources gamma et neutron pour couvrir gamme d'énergie du e+
  - **^{68}Ge, ^{124}Sb, ^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{65}Zn, ^{24}Na, 1H(n,g), Am-Be, ^{252}Cf**
- Fréquents scans du détecteur avec source ^{54}Mn 835 keV (1x/semaine)



Tubes internes au centre des cellules (1-4-6 en Phase I, 1-2-4-5-6 en Phase II)

Pantographe pour calibration externe du GC

Rail pour calibration sous le détecteur



Dispositifs de calibration

Injection lumière LED + fibres optiques

- Calibration du gain des PMTs (pe fits) 1x/4h
- Linéarité de l'électronique (PMT + DAQ) < 1%

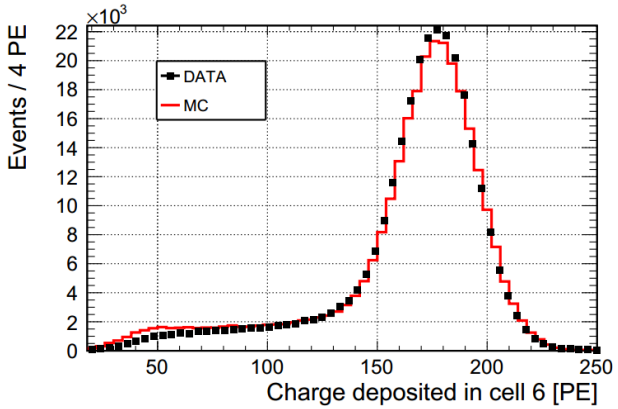
Calibration avec circulation de sources

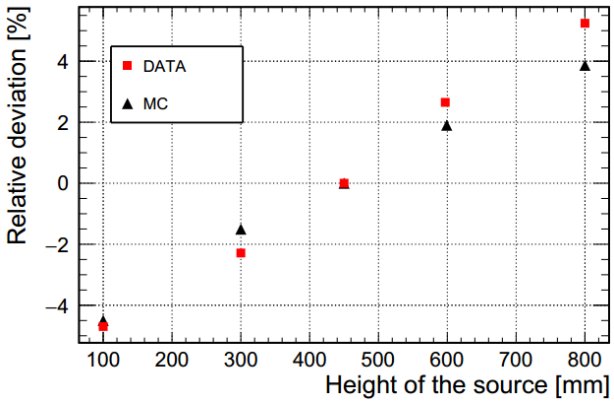
- 3 dispositifs : interne au centre des cellules, externe autour du détecteur et sous le détecteur
- Sources gamma et neutron pour couvrir gamme d'énergie du e+
  - **^{68}Ge, ^{124}Sb, ^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{65}Zn, ^{24}Na, 1H(n,g), Am-Be, ^{252}Cf**
- Fréquents scans du détecteur avec source ^{54}Mn 835 keV (1x/semaine)

Ajustement des paramètres du MC

- Collection de lumière, propriétés du LS, non linéarité (kB)

Collection de lumière :
260 pe/MeV cible
360 pe/MeV GC
σ/E = 9% 54Mn 835 keV
Homogénéité ± 5%

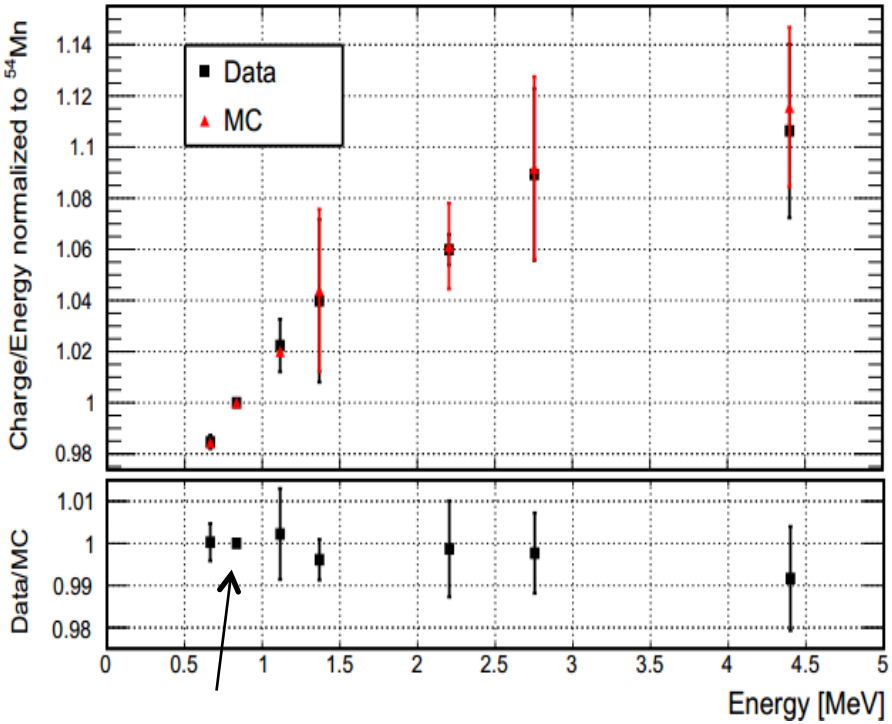




Courbe de quenching

Non linéarité de l'émission de lumière du scintillateur pour les grands dE/dx

- Loi de Birks : $$\frac{dL}{dx} \propto \frac{dE}{dx} \Big/ \left(1 + k_B \frac{dE}{dx}\right)$$
- Une campagne de mesure par cycle, avec les différentes sources



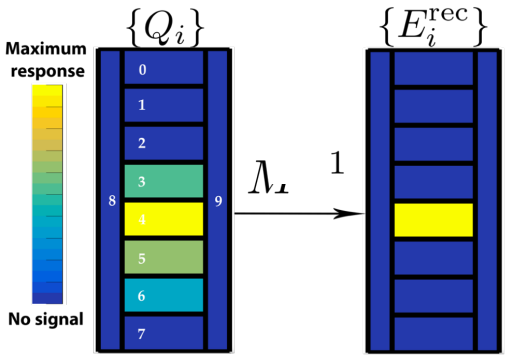
Référence : ^{54}Mn 834 keV

Mesure précise de la courbe de quenching
→ Incertitudes systématiques faibles

k_B ajusté dans le MC
k_B= 0.096± 0.007 mm/MeV

Reconstruction de l'énergie

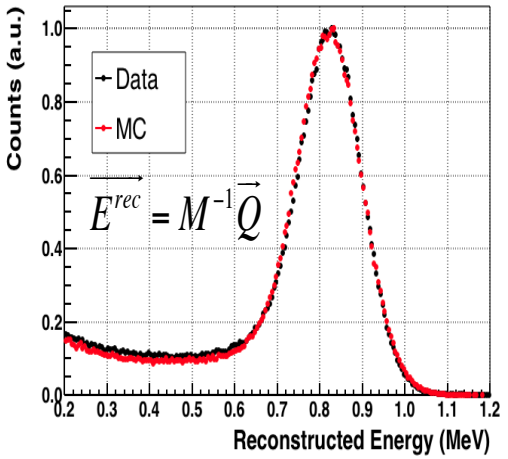
- Formalisme : correction au 1er ordre des effets de collections de lumière



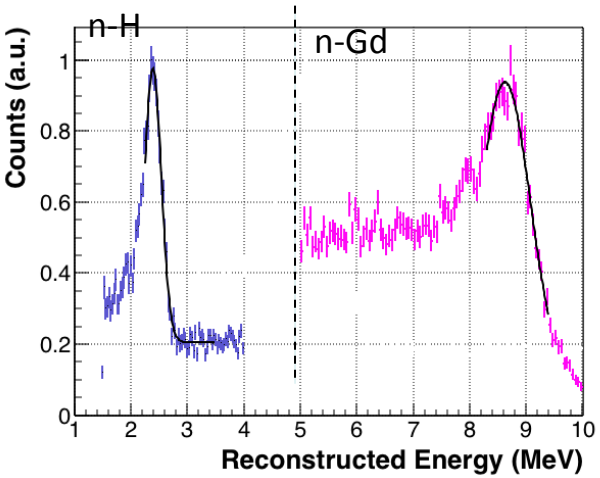
$$Q_i = \sum_{j=cells} E_j C_j L_{ji} = \sum_{j=cells} E_j M_{ji}$$

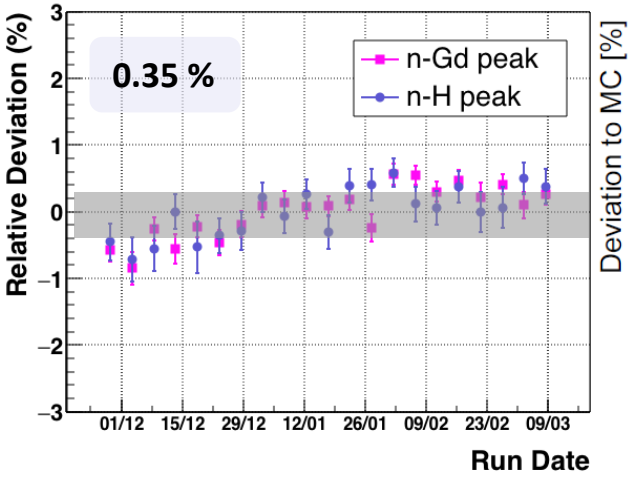
Coef. de calib. pe/MeV

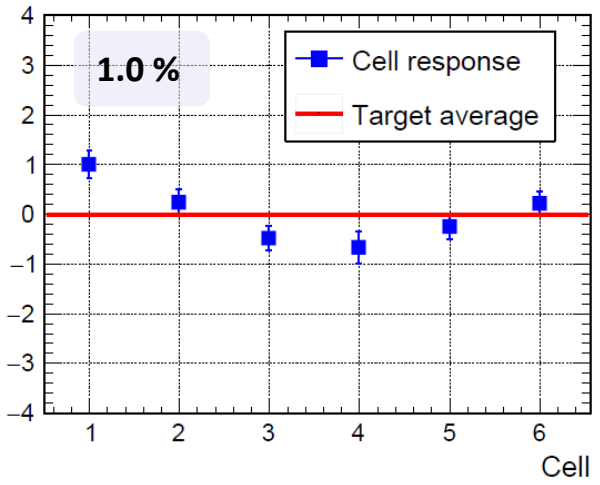
Diaphonie optique cell j vers cell i (cosmiques)



- Validation avec les pics de capture neutron cosmique n-H et n-Gd→ systèmatiques ~ 1%







Efficacité neutron

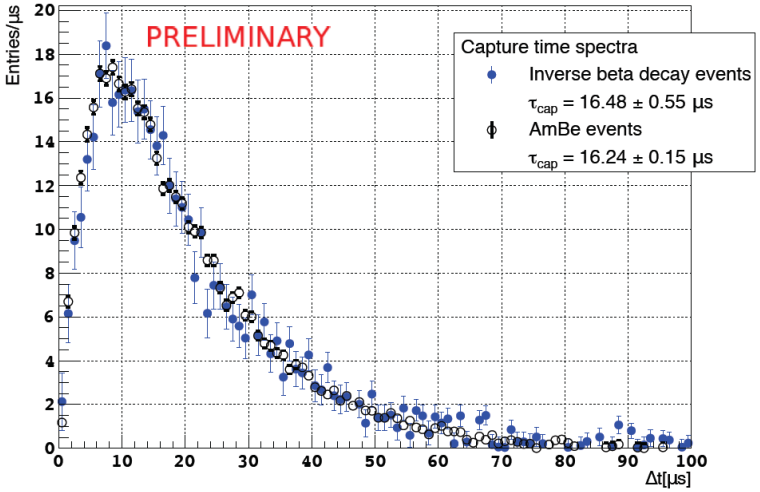
Calibration mensuelle avec source AmBe

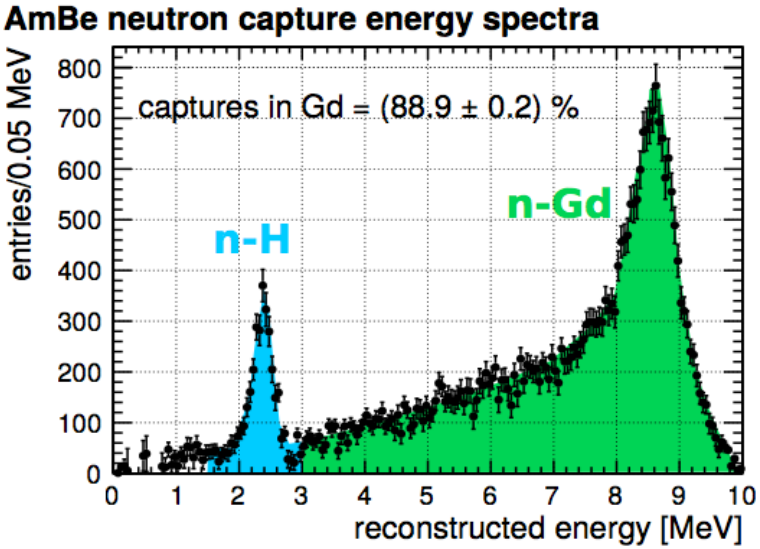
- $T_{capture}$ = 16 µs
- Compatible avec temps de capture des evts IBD

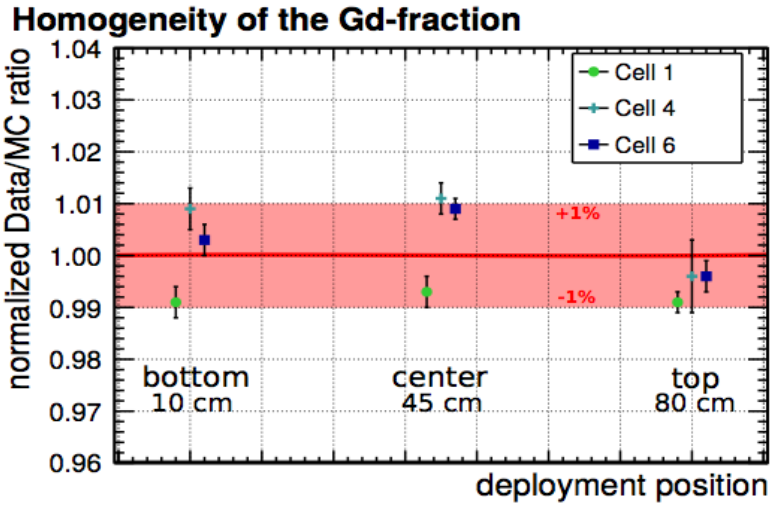
- Bon accord data/MC concernant la variation relative de l'efficacité neutron en fonction de la géomètrie (cellule, hauteur)

- Fraction absolue de Gd est ajustée dans le MC

→ détermination de l'efficacité absolue de détection neutron



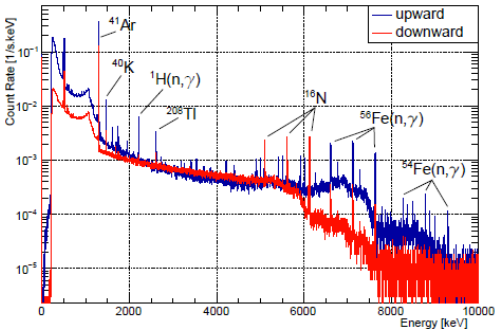




Blindages passif et actif

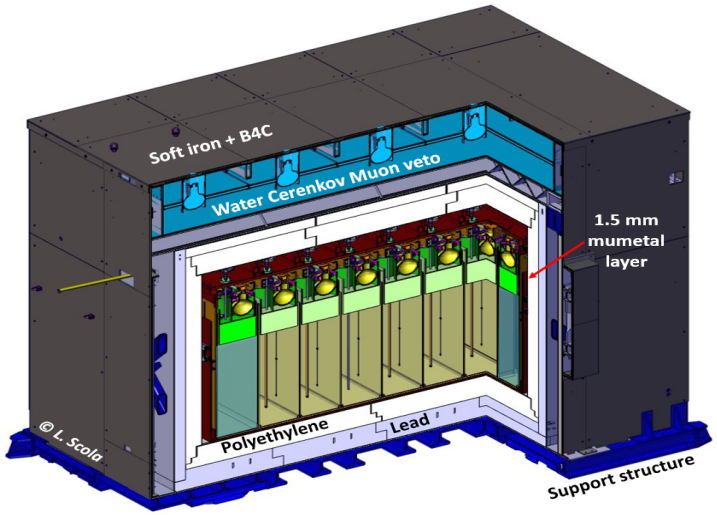
Plusieurs campagnes de caractérisation du site avant la conception des blindages

- Gammas de haute énergie capture neutron sur métaux (Fe, Al)
- ^{41}Ar dans air du bâtiment, ^{16}O dans circuit de refroidissement eau primaire
- Flux de muon ÷ 4/extérieure
- Champ magnétique dans la zone IN20

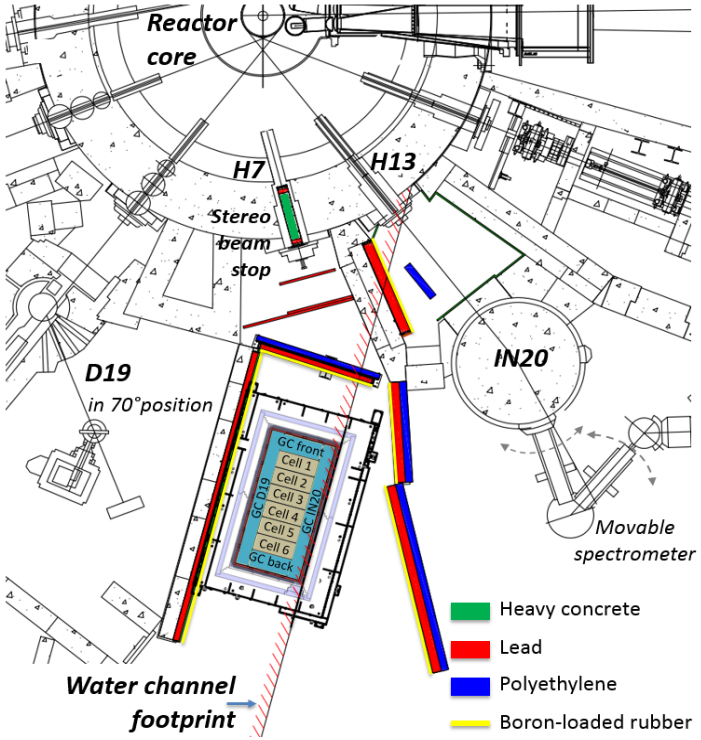


Blindages

- Aménagement casemate : changement tube H6/H7, conception des blindages ext
- Blindage passif autour de STEREO (Pb + PE + B4C)
- Blindage magnétique (Fer doux + mu-metal)
- Veto muon : Cerenkov à eau

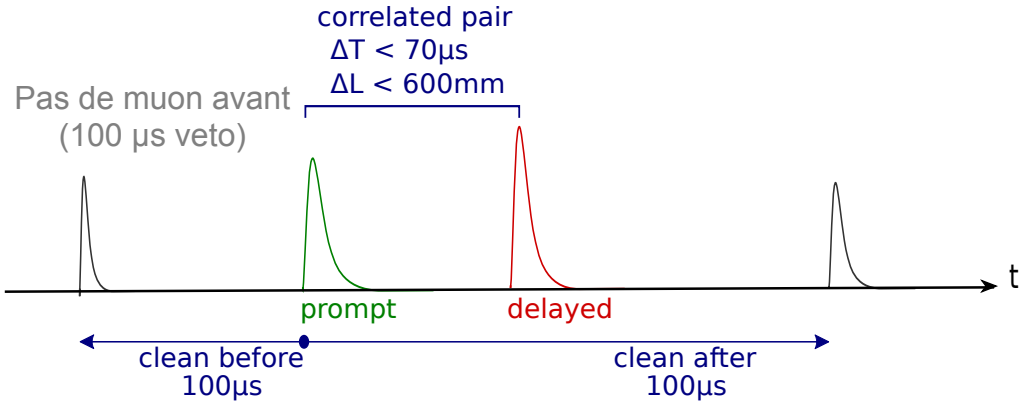


Déplacement structure + blindages (93t) sur coussins d'air



Sélection des événements neutrino

Sélection de l'IBD



Signal prompt :

$1.6 < E_p < 7.1$ MeV

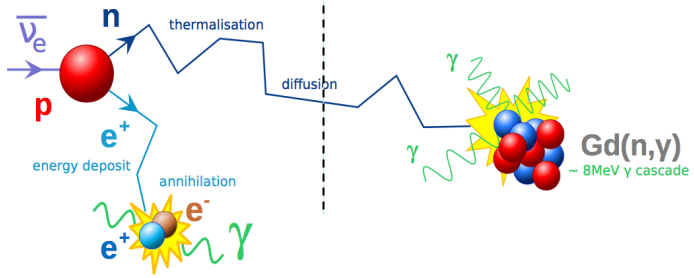
$E_{voisines} < 800$ keV

$Q_{max}/Q_{tot} < 0.5$

Signal retardé :

$4.5 < E_r < 10$ MeV

E cible > 1 MeV



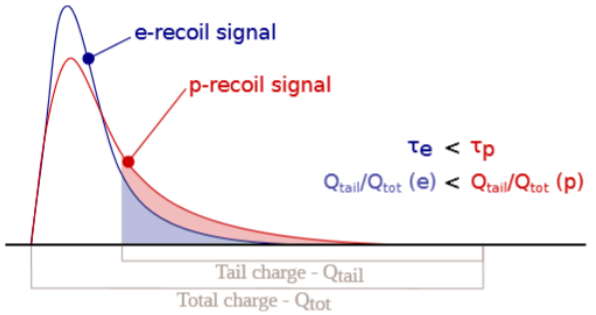
Réjection du bruit de fond

- Accidentels
  - Gammas et neutrons ambiants
    - **Mesure par la méthode des portes décalées en temps**
- Bruit de fond d'origine cosmique
  - Muon
    - **ΔT_μ >100 μs**
  - Neutrons rapides ou multi-neutrons
    - Prompt n ou recul p
    - Retardé capture neutron
    - **Isolation 100 μs avant et après la paire**
  - Muon-stop
    - Prompt : muon
    - Retardé = électron de Michel
    - Δ T = 2,2 μs
    - **Asymétrie de charge par cellule : $Q_{max}/Q_{tot} < 0.5$**

PSD : discrimination de forme du signal

Discrimination p-recul / e-recul

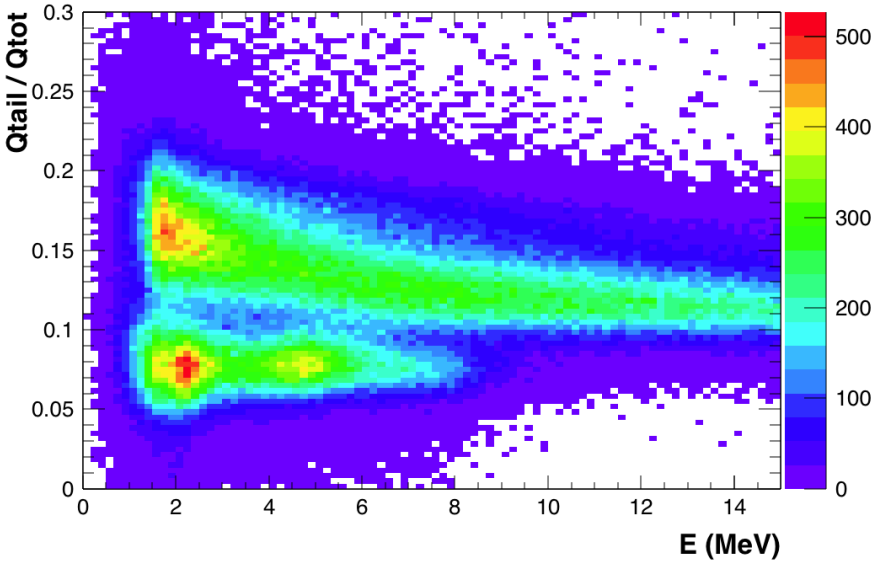
- PSD : charge retardée / charge totale (Qtail/Qtot)



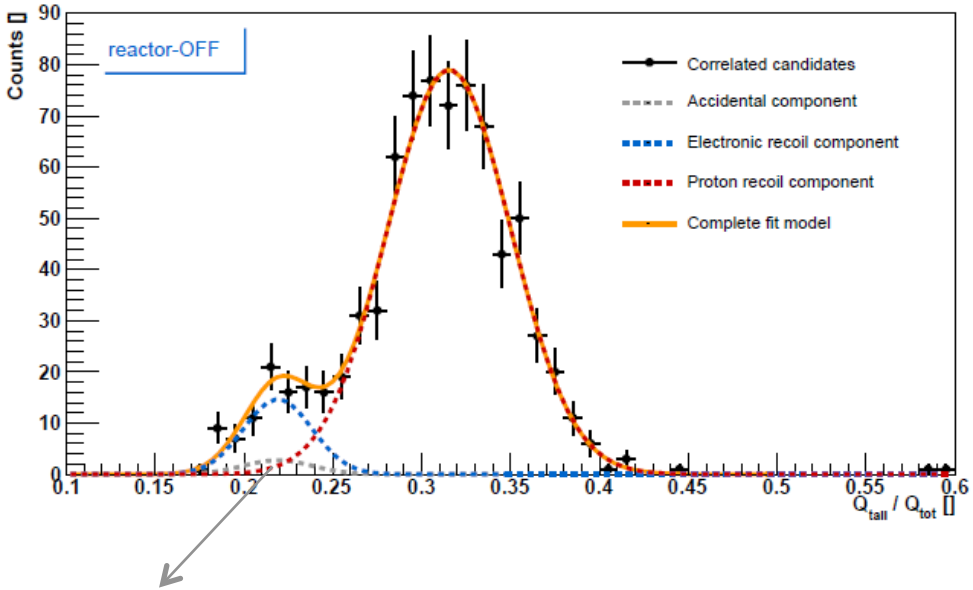
Ajustement du PSD avec un modèle multi-gaussiennes

- → Séparation de la composante électron de recul des proton de rec

PSD dans la cellule 1



Projection du PSD pour bin de 1 MeV à 3.375 MeV (23 jours)

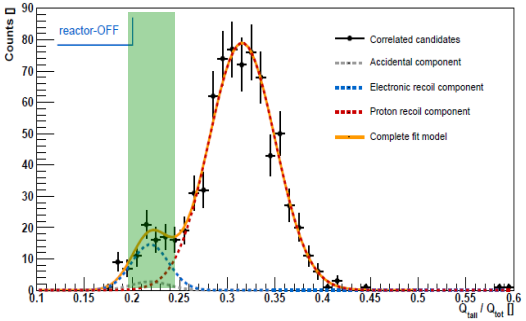


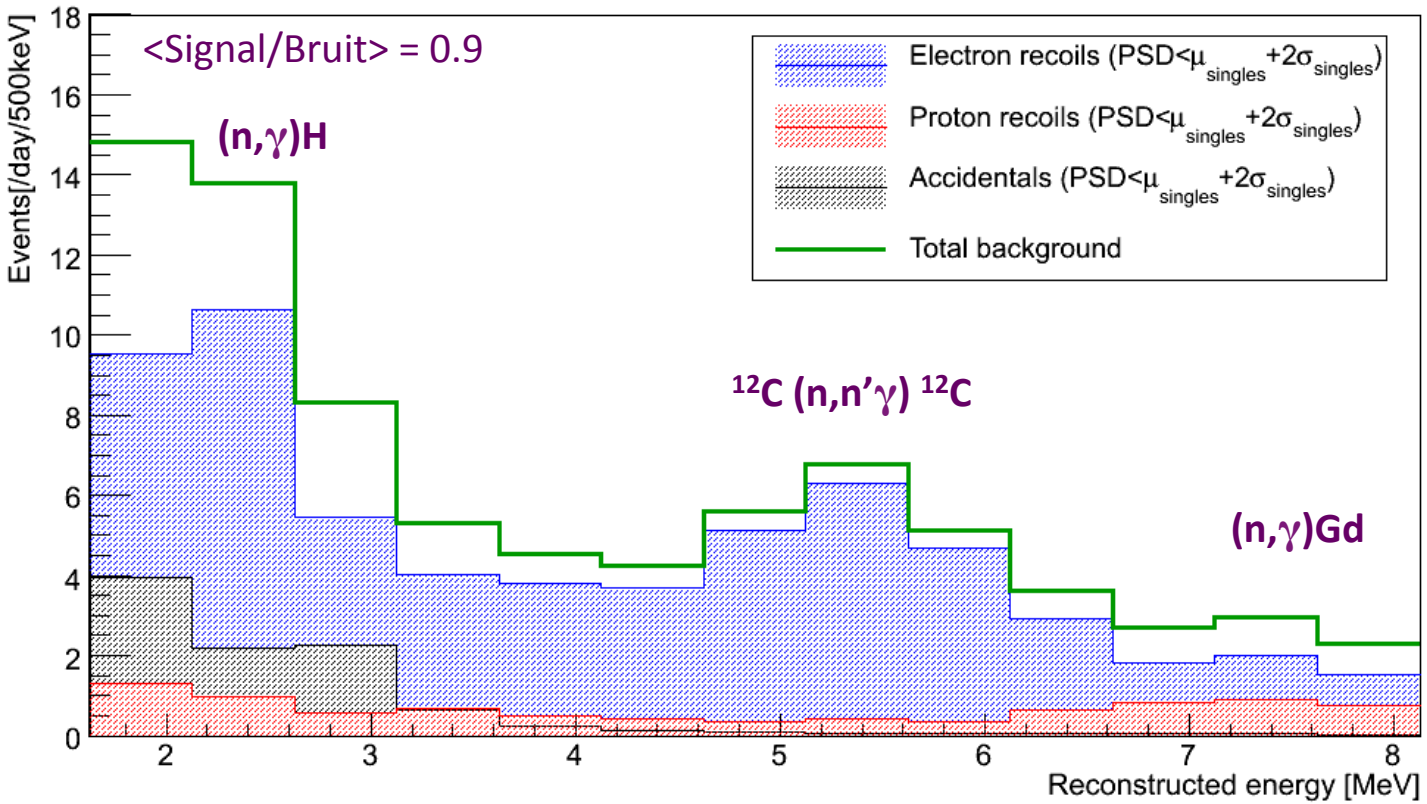
Amplitude des accidentels mesuré par méthode des portes décalées en temps

Spectre réacteur OFF

Spectre en énergie du signal prompt mesuré réacteur OFF

- Après coupure PSD : $Q_{tail}/Q_{tot} < \mu_{single} + 2\sigma_{single}$
- Identification des composantes du signal par l'approche multi-gaussienne
- Bruit de fond dominant = multi-neutrons + diffusion inélastique sur n-^{12}C





Extraction du signal neutrino : Approche multi-gaussiennes

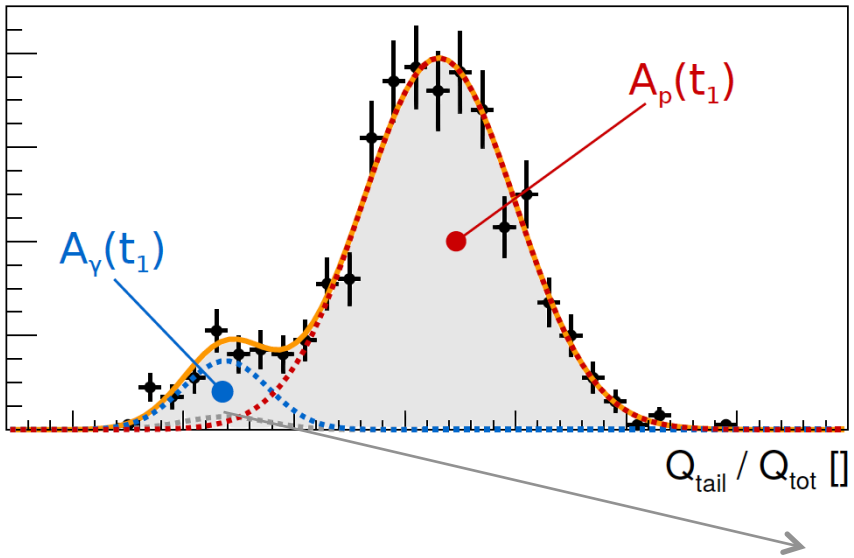
Approche multi-gaussienne

- Validation du modèle du PSD du bruit de fond en réacteur OFF : **A_γ/A_p par cellule et par bin d'énergie**
- Extraction du signal neutrino en réacteur ON, **A_γ/A_p fixé par mesures réacteur OFF**

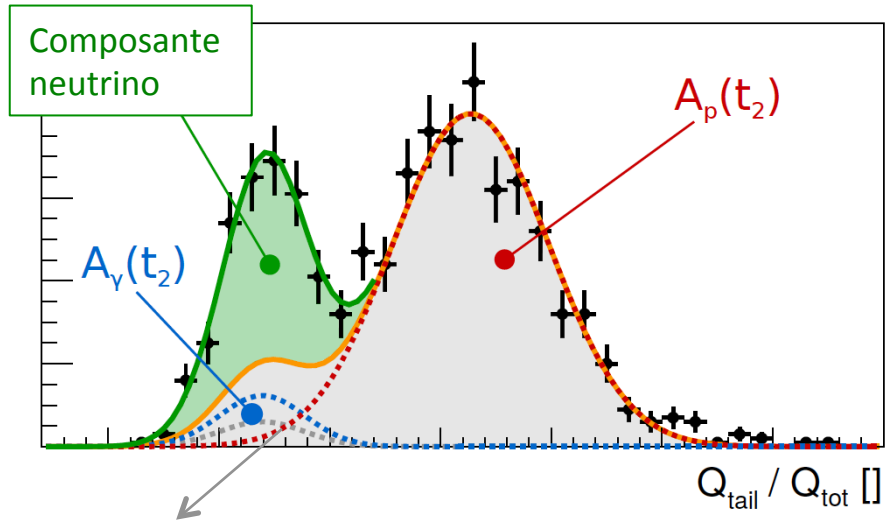
Méthode auto-consistante pour estimer le bruit sous la composante neutrino

- Alternative à la méthode standard de soustraction ON-OFF
- S'adapte aux variations du PSD avec la température
- Auto-normalisation globale des effets de pression atmosphérique

Réacteur OFF : Cellule 1 - 3.375 MeV - 23 jours



Réacteur ON : signal neutrino + modèle de bruit de fond



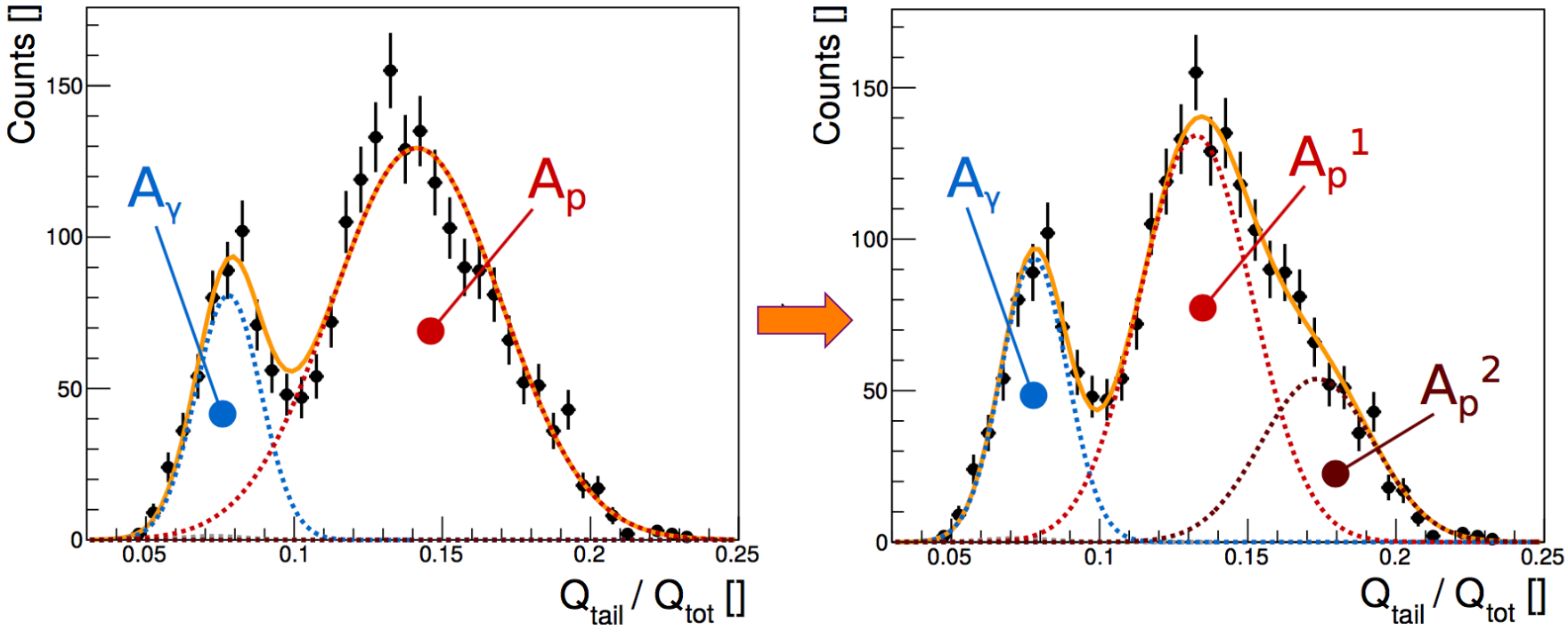
Amplitude des accidentels mesuré par méthode des portes décalées en temps

Extraction du signal neutrino

Plus de statistique en Phase-II réacteur OFF (84 jours) + détecteur stable

→ Amélioration de la modélisation du PSD du bruit de fond

- Ajout d'une seconde composante pour les protons de recul à haute énergie (> 4 MeV)



Méthode des ratios : Formalisme

Une cellule choisie comme référence $Cell_{ref}$

→ Comparaison des rapports des spectres simulés et mesurés $Cell_i$ / $Cell_{ref}$

$$R_{i,l}^{Data} = \frac{Data_{i,l}}{Data_{i,lref}}; \quad R_{i,l}^{MC} = \frac{Model_{i,l}(\alpha)}{Model_{i,lref}(\alpha)}$$

Méthode robuste, insensible à la forme du spectre prédit et à la normalisation absolue

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{NEbin} \sum_{l1}^{Ncells-1} \sum_{l'}^{Ncells-1} \left(R_i^{Data} - R_i^{MC}(\alpha)\right) V_i^{-1} \left(R_i^{Data} - R_i^{MC}(\alpha)\right)$$
$$+ \sum_{l=1}^{Ncells} \left(\frac{\alpha_l^{NormUncor}}{\sigma_l^{NormUncor}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha^{Escale}}{\sigma^{Escale}}\right)^2 + \sum_{l=1}^{Ncells} \left(\frac{\alpha_l^{Escale}}{\sigma_l^{Escale}}\right)^2$$

Vi : matrice de covariance prenant en compte le fait que la cellule de référence est commune à tous les ratios
Les coefficients α prennent en compte les incertitudes systématiques

Pull terms	Cell to cell correlated	Uncorrelated
Energy scale	0.35%	1.10%
Normalization	-	1.70% (3.40% cell 4)

Méthode des ratios : Rapport des spectres

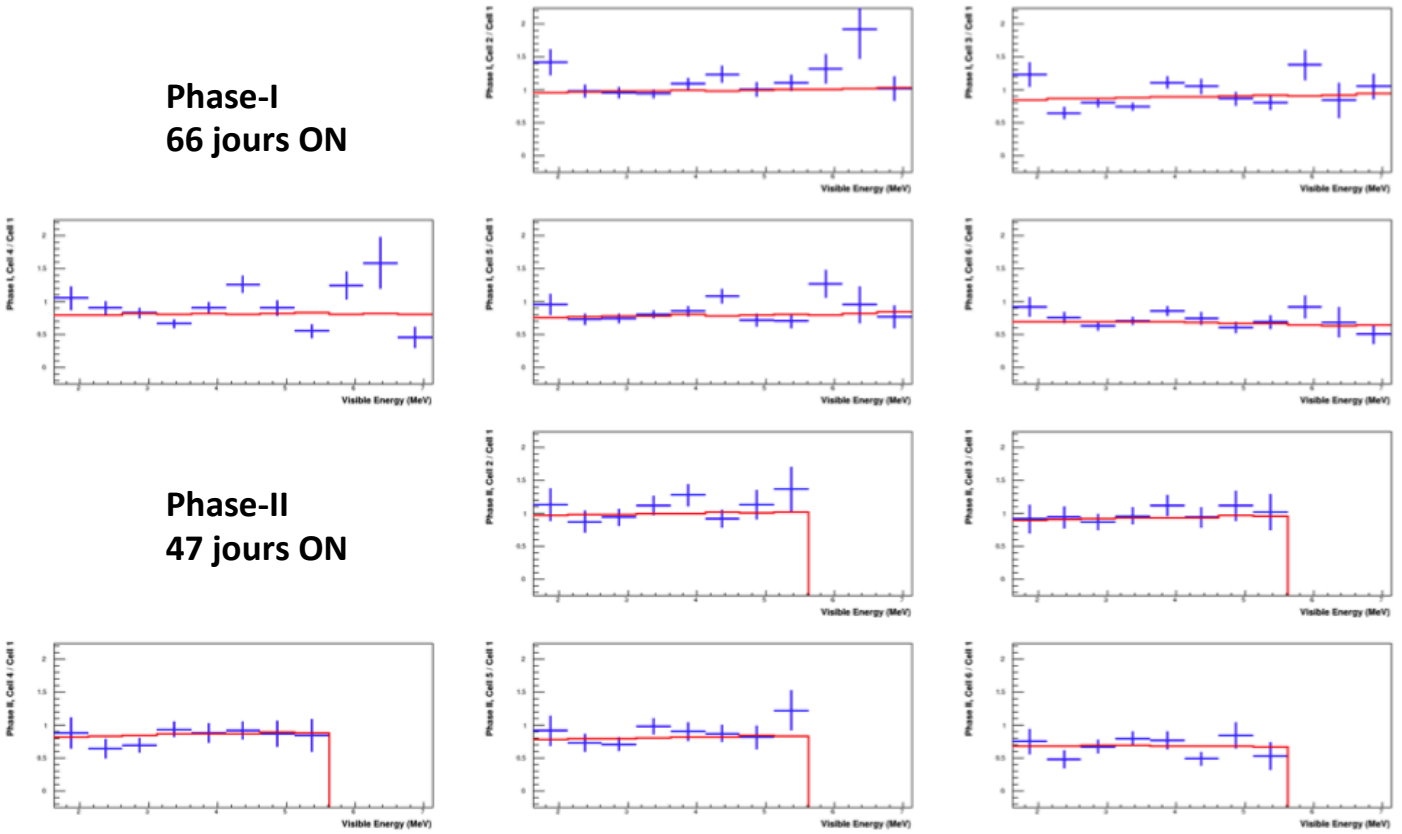
Rapport des spectres mesurés pour les cellules 2 à 6 avec la cellule 1 comme référence

Comparaison avec un modèle sans oscillation

- → **Hypothèse de non oscillation (H0) n'est pas rejetée** : p-value = 34 % (40%) pour les phases I et I+II
- Pull termes restent compris dans ± 1 σ

Phase-I
66 jours ON

Phase-II
47 jours ON



+ Rapports mesurés
- Prédiction sans oscillation

396 ± 4 ve / jour

Méthode des ratios Phase-I arXiv:1806.02096

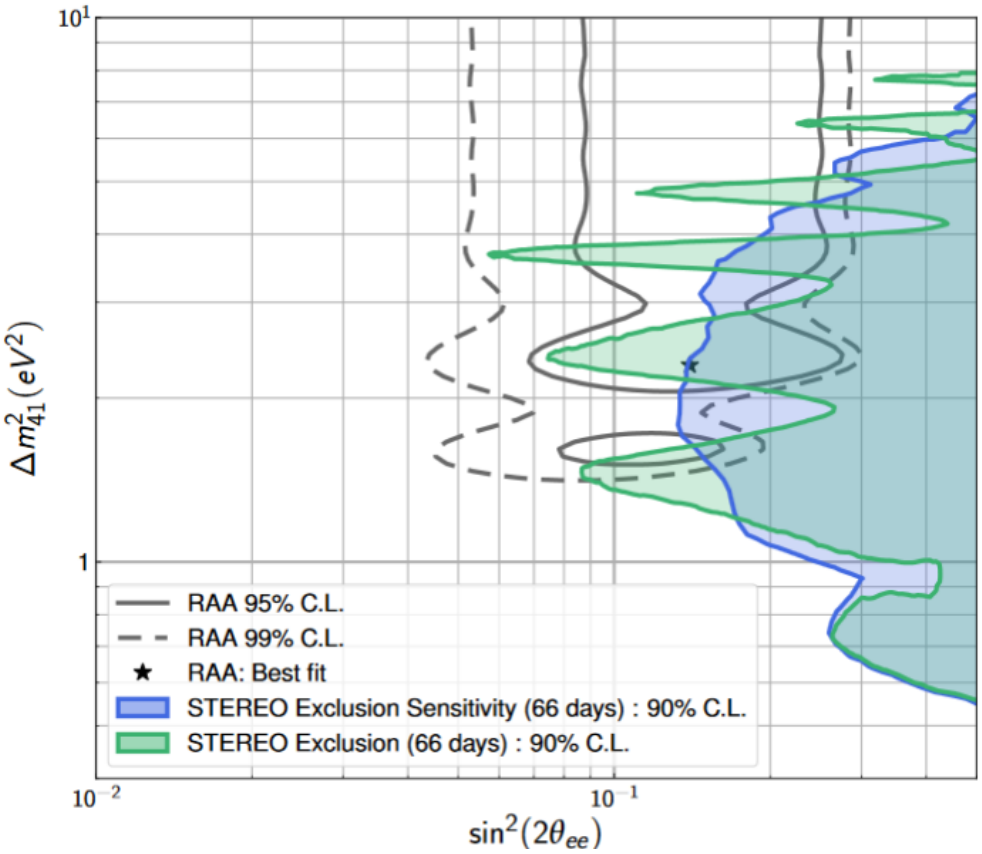
Résultats de la phase-I

- **66 jours ON**
- **396 ± 4 ve / jour**

- Méthode du raster-scan (bande en Δm^2)
- Estimation des distributions de $\Delta\chi^2$ à l'aide de pseudo-exp. MC

- **Le cas le plus probable de la RAA est rejeté à 97.5 % CL**

D. Lhuillier @ Moriond EW 2018



Méthode des ratios Phase-I+II Neutrino 2018 - Heidelberg

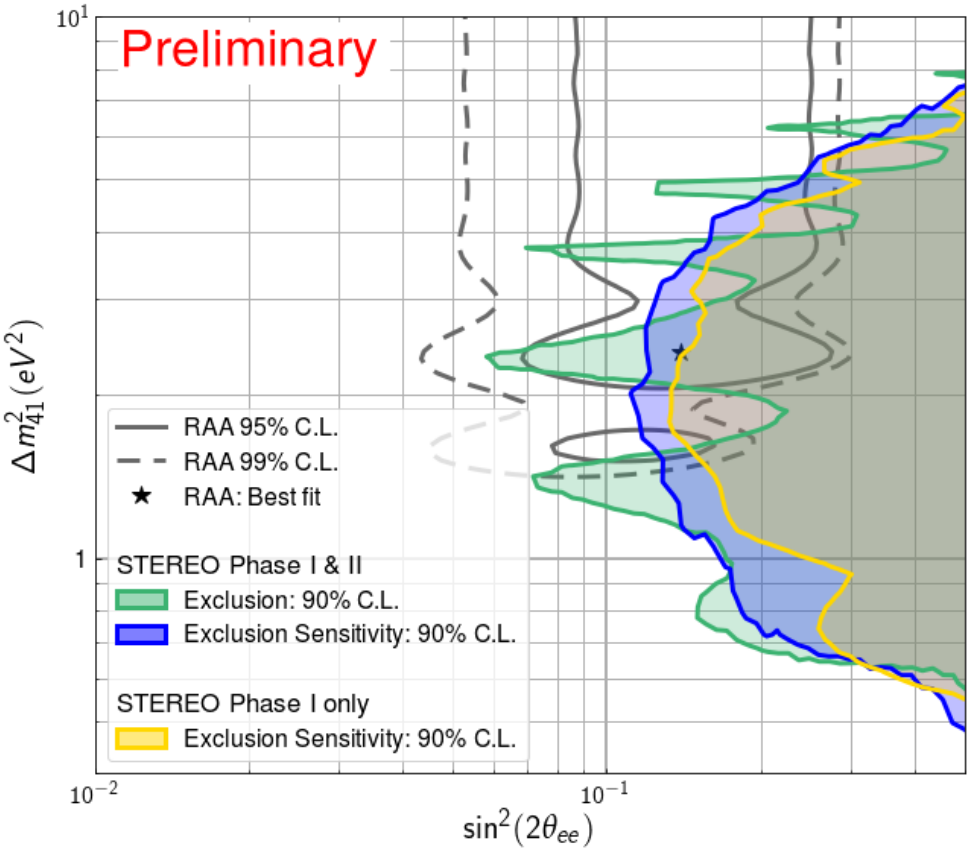
Résultats combinés des phases I et II

- **66 + 47 jours ON**
- Phase I et Phase II sont considérées comme des **expériences indépendantes**

$$\Delta\chi^2 = \chi^2_I(\vec{\alpha}_I) + \chi^2_{II}(\vec{\alpha}_{II})$$
$$\vec{\alpha}_I \neq \vec{\alpha}_{II}$$

- **Le cas le plus probable de la RAA est rejeté à 98 % CL**

J. Lamblin @ Neutrino 2018



STEREO @ l'IN2P3

Point sur les réalisations et
les ressources humaines et financières

STEREO @ l'IN2P3

Deux laboratoires : le LPSC et le LAPP

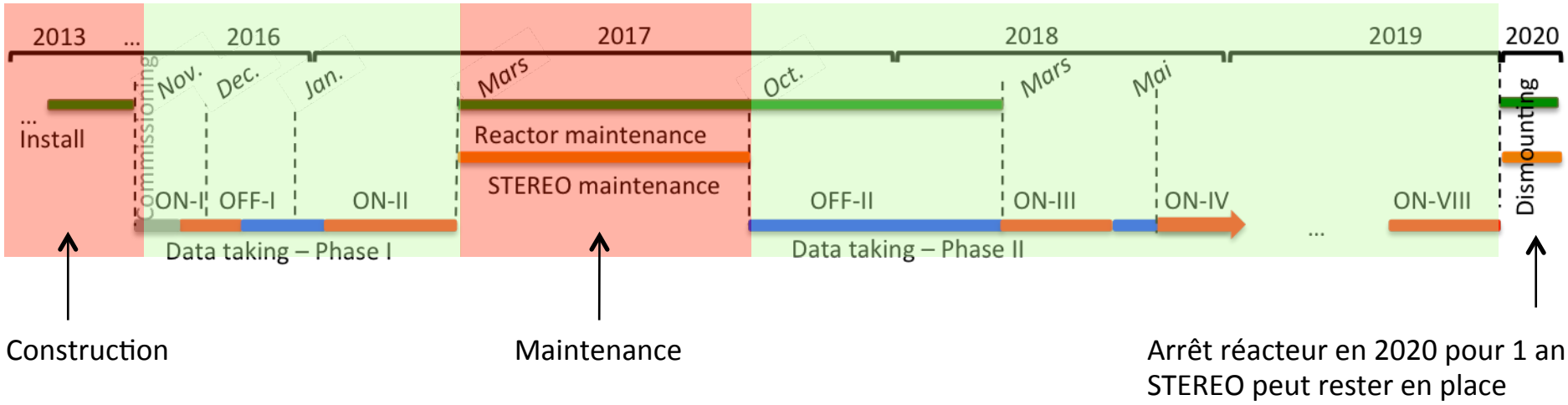
- 6 physiciens permanents, 2 postdoc et 1 doctorant + les équipes techniques des 2 laboratoires

Planning :

- Phase de construction terminée en septembre 2016
- Maintenance durant été 2017 terminée
- Prise de données jusque fin 2019, voir au-delà → Analyse jusqu'en 2021
- Arrêt du réacteur en 2020 pour 1 an, 2 cycles possibles en 2021 avant le déplacement de STEREO

→ Un point sur le cas scientifique sera fait au 1er semestre 2019 (chiffrage des erreurs systématiques en cours)

- Démontage prévu en 2020 /2021



Les contributions techniques

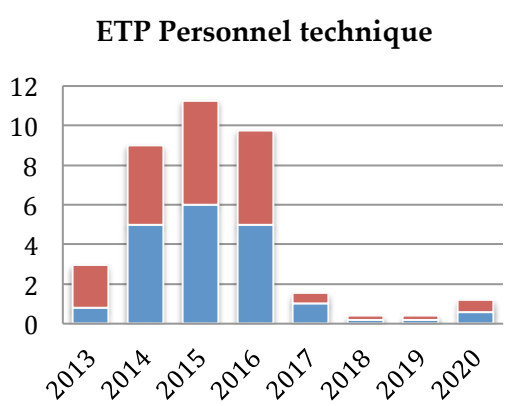
Partenaires	Responsabilités Techniques
CEA/Irfu	Coordination de projet – porte parole Détecteur interne : cuve inox + pièces acryliques Design blindage polyéthylène Dossier sureté
IN2P3/LPSC	Coordination installation sur site Veto muon **Electronique et acquisition de données** **Contrôle lent et monitoring** Système d'injection de lumière 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 sureté

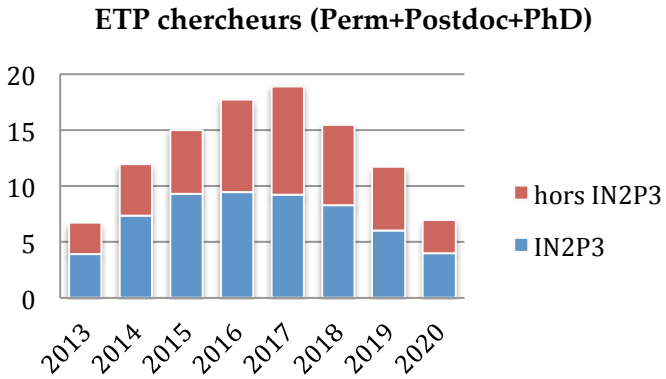
Le LPSC et le LAPP assurent **l'essentiel de la responsabilité de la prise de données**

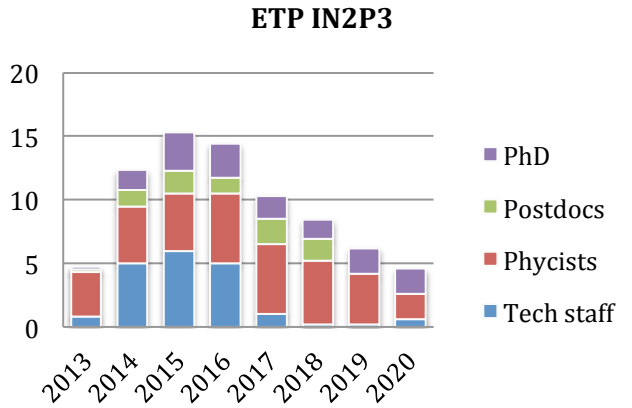
- Coordination des shifts et de la prise de données (LPSC)
- Expertise de l'acquisition, du monitoring, du prétraitement et du transfert des données (LPSC)
- Expertise de la calibration externe (LAPP)

Les ressources humaines

Forte visibilité des équipes de l'IN2P3 pour les contributions tech. et pour l'implication des physiciens







- Nb de physiciens IN2P3 / Nb total collaboration = 9 / 20
- LAPP (3): 2 physiciens permanents dont 1 EC et 1 émérite + **1 postdoc (--> fin 2018)**
- LPSC (6): 4 physiciens dont 1 EC + **1 postdoc (--> fin 2018)** + 1 doctorant (→2019)
- 3 thèses soutenues sur STEREO dont 2 au LPSC et 1 au LAPP / 6 thèses total

Renforts souhaités :
+ 2 doctorants espérés à la rentrée 2018
+ 2 postdocs pour 2019 et delà

Le LPSC et le LAPP ont des **rôles majeurs dans l'analyse des données**

- Exploitation des données de calibration + Reconstruction en énergie (LAPP, LPSC)
- Etude et la discrimination du bruit de fond (cosmiques, neutrinos, réacteur à l'arrêt) (LPSC, LAPP)
- Simulation Monte-Carlo (LPSC)
- Extraction statistique des paramètres d'oscillation (LPSC)

Les ressources financières

Investissement : l'essentiel du projet a été financé par l'ANR

- Soutien local du LPSC et de l'Université de Grenoble Alpes

TOTAL Dépenses investissement	**1 919 k€**	
Financement ANR LPSC/LAPP		531 k€
Financement LPSC		40 k€
Financement Univ. Grenoble Alpes		36 k€
Financement AP IN2P3		52 k€
Financement à verser en 2018 (LAPP / LPSC / IN2P3)		74 k€
TOTAL Financement labos IN2P3		**733 k€**

Prévoir le financement des frais de démontage en 2020/2021, part IN2P3 estimée à 8 k€

Personnels

- IN2P3 : Financement de 3 ans de postdoc (LAPP) + 1 bourse de thèse (LPSC)
- Labex ENIGMASS : Financement de 4 ans de postdoc (LPSC)

Conclusions et perspectives

- STEREO prend des données depuis novembre 2016.
- Une bonne maitrise de la réponse du détecteur a été obtenue malgré les conditions difficiles de la Phase-I → arXiv:1804.09052.
- Une méthode originale et alternative à l'habituelle soustraction ON-OFF a été développé pour l'extraction du signal neutrino. 40 k neutrinos ont déjà été détectés avec un S/B ~ 0.9.
- Le bruit de fond est dominé par les coïncidences γ–γ d'origine cosmique avec une structure dans le spectre en énergie.
- Les premiers résultats, utilisant une méthode robuste basée sur la comparaison des rapports des spectres mesurés, sont compatibles avec une non-oscillation et excluent le cas le plus vraisemblable de l'anomalie des neutrinos de réacteur à 98 % CL →arXiv:1806.02096.
- Les études de la réponse du détecteur et la bonne maîtrise des systématiques associées devraient permettre d'obtenir rapidement un nouveau spectre de référence pour la fission de l'^{235}U.
- STEREO devrait atteindre sa sensibilité finale fin 2019 avec plus de 300 jours de données.