



RECHERCHE D'UN NEUTRINO STÉRILE AVEC L'EXPÉRIENCE STEREO

Laura Bernard

02 mars 2020





RECHERCHE D'UN NEUTRINO STÉRILE AVEC L'EXPÉRIENCE STEREO

I. Neutrinos

II. L'anomalie des antineutrinos de réacteurs

III. L'expérience STEREO et résultats

VI. Comparaison aux autres expériences



LE NEUTRINO

« I have done a terrible thing — I have postulated a particle that can not be detected »

Pauli

- 1930 : spin 1/2, neutre, de masse nulle, interagit faiblement ...

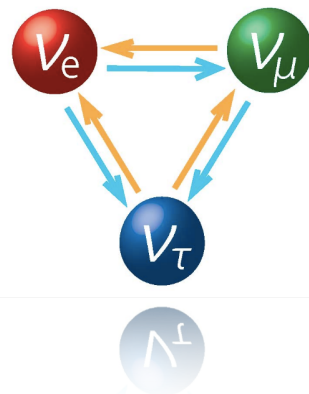
Difficile à détecter !



- 1956 : Expérience *Poltergeist* (esprit frappeur) Première observation !

Réacteur nucléaire ...

... Soleil (65 milliards /cm²/sec), Supernova, Radioactivité naturelle, Atmosphère, Accélérateurs ...



- Aujourd'hui : 3 saveurs de neutrinos ... qui **oscillent** et ont une **masse** !

LES NEUTRINOS : OSCILLATIONS

Formalisme :

saveur : interaction masse : propagation

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Matrice 3×3 paramétrisée par :

- Angles de mélange $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$
- Phase(s) complexe(s) δ_{CP}

Les paramètres sont déterminés **expérimentalement** et reposent sur des **mesures d'oscillations** de neutrinos (apparition / disparition)

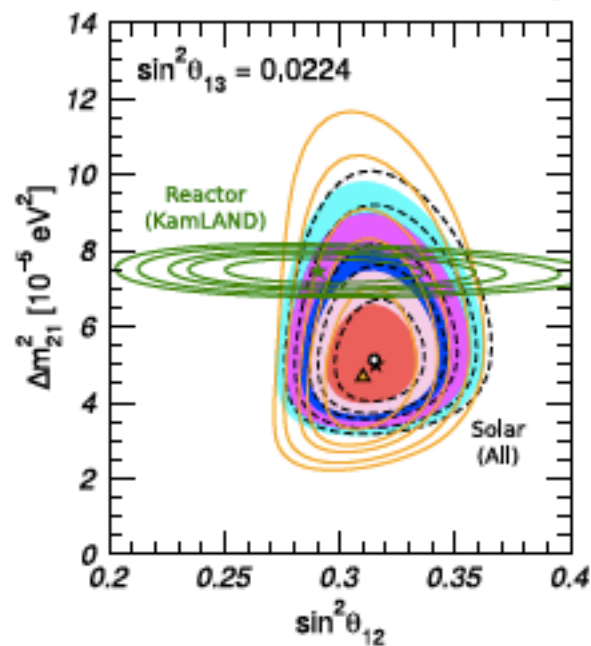
Dans un cadre à deux saveurs :

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(E_{\bar{\nu}_e}, L) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E_{\bar{\nu}_e} [MeV]} \right)$$

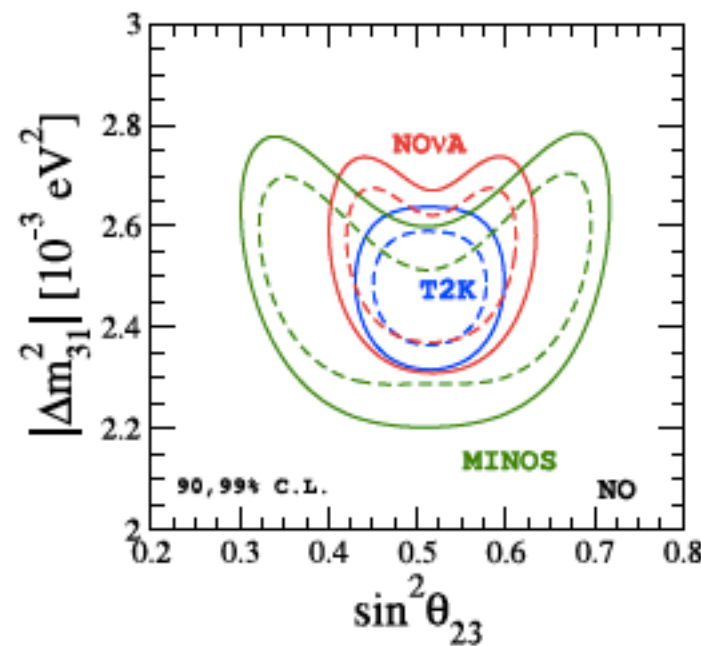
L'oscillation dans un cadre à 3ν est paramétrisée par

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23} - \Delta m_{21}, \Delta m_{31}, \Delta m_{32} - \delta_{\text{CP}}$$

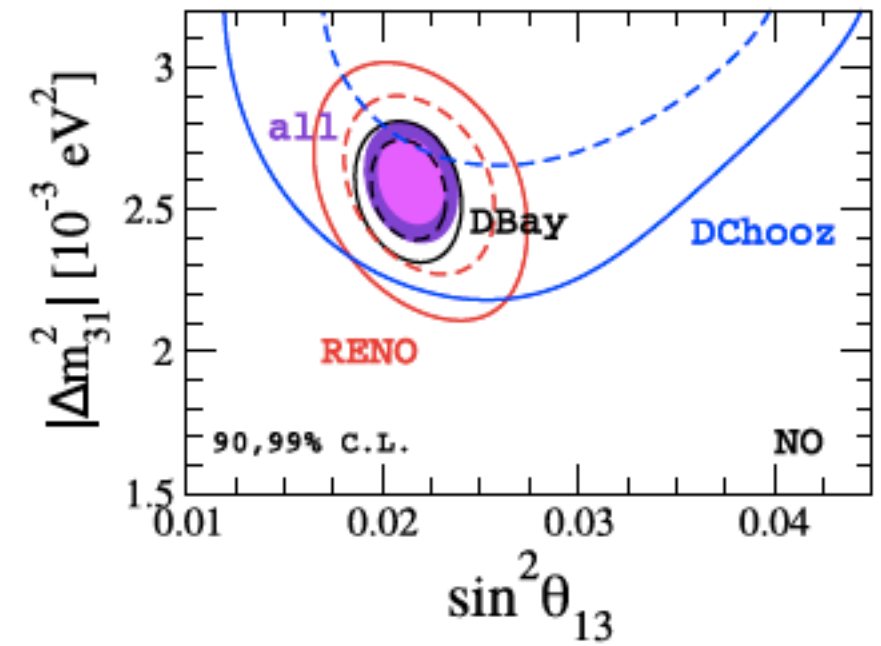
Situation expérimentale :



arXiv:1811.05487



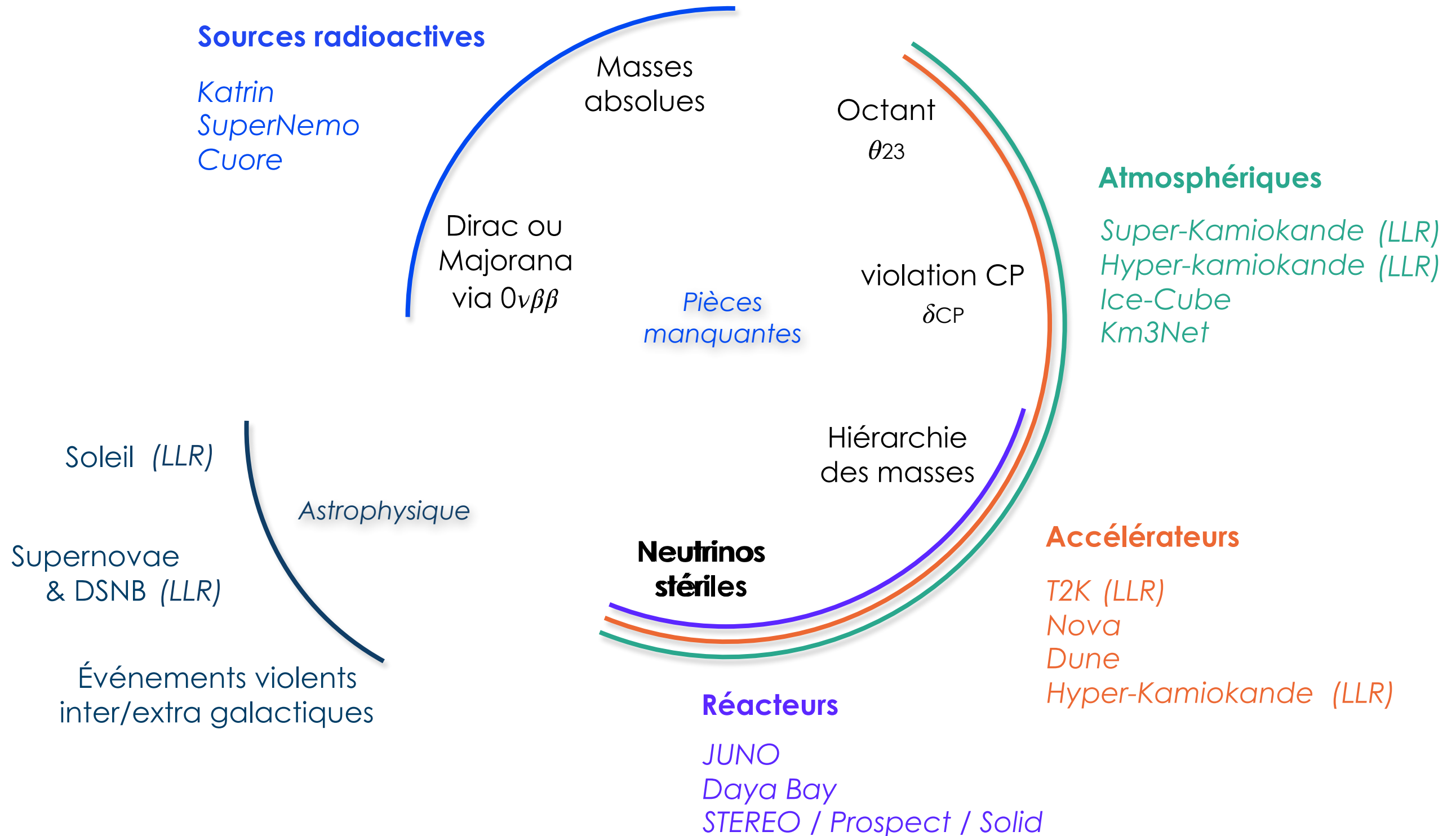
arXiv:1708.01186



arXiv:1708.01186

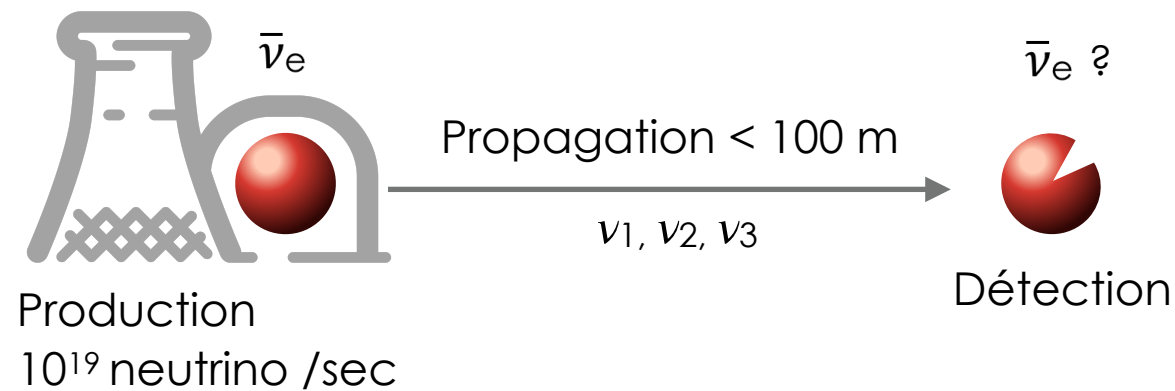


LES NEUTRINOS : PANORAMA 2020

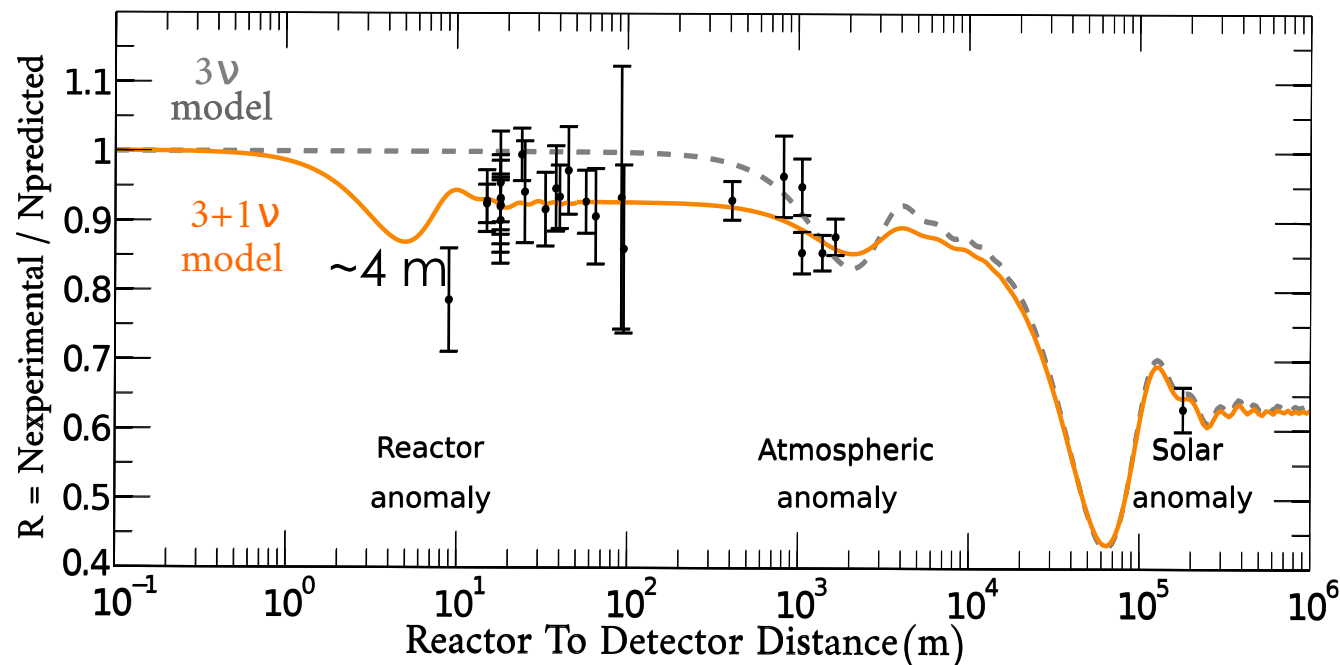


Note : Liste non exhaustive

ANOMALIE DES ANTINEUTRINOS DE RÉACTEURS (RAA)



2011 : Ré-évaluation des flux prédits par deux méthodes indépendantes → Déficit de ~7 % à 3σ



- **Problème dans la prédiction du flux ?**
- **Nouvelle physique ?**

Introduction d'un 4^{ème} neutrino

- **Nouveau mélange**

$$\Delta m^2_{\text{nouveau}} = 2.3 \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta_{\text{nouveau}}) = 0.14$$

Meilleur ajustement

- **Stérile**

Autres anomalies dans d'autres secteurs

GALLEX/SAGE (sources de calibration)

LSND (accélérateur)

Disparition des $\bar{\nu}_e$ de réacteur :

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(E_{\bar{\nu}_e}, L) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E_{\bar{\nu}_e} [MeV]}\right)$$

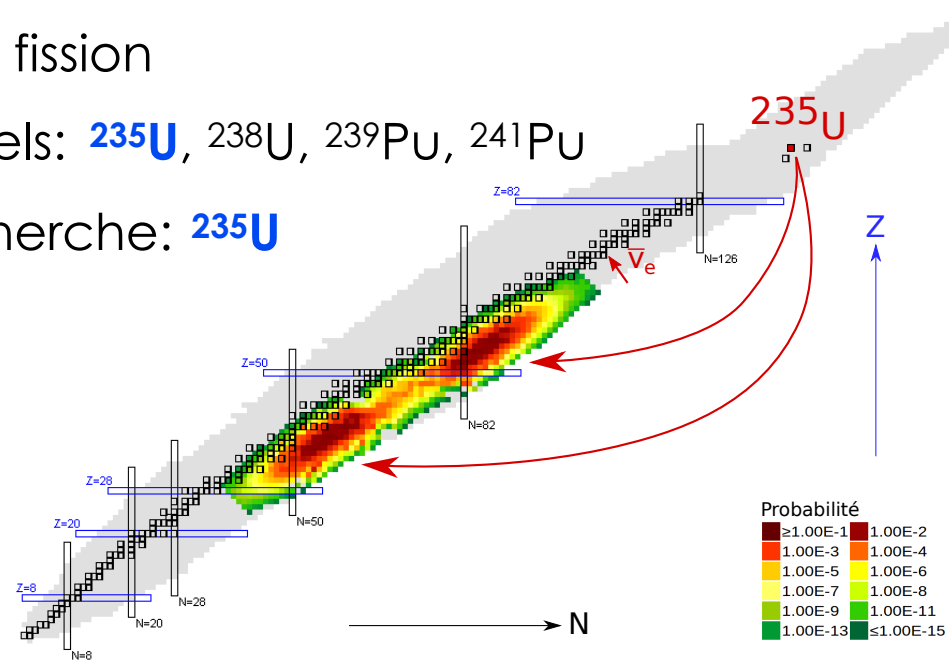
NEUTRINOS DE RÉACTEURS

Production : Désintégrations β^- des produits de fission

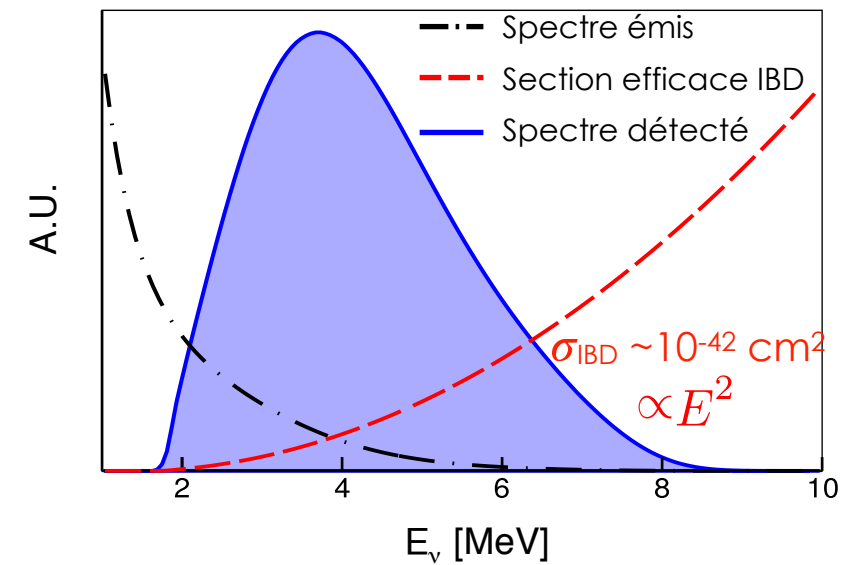
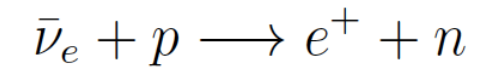
- Flux pur d' $\bar{\nu}_e$,
- ~ 6 neutrinos / fission

Réacteurs industriels: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu

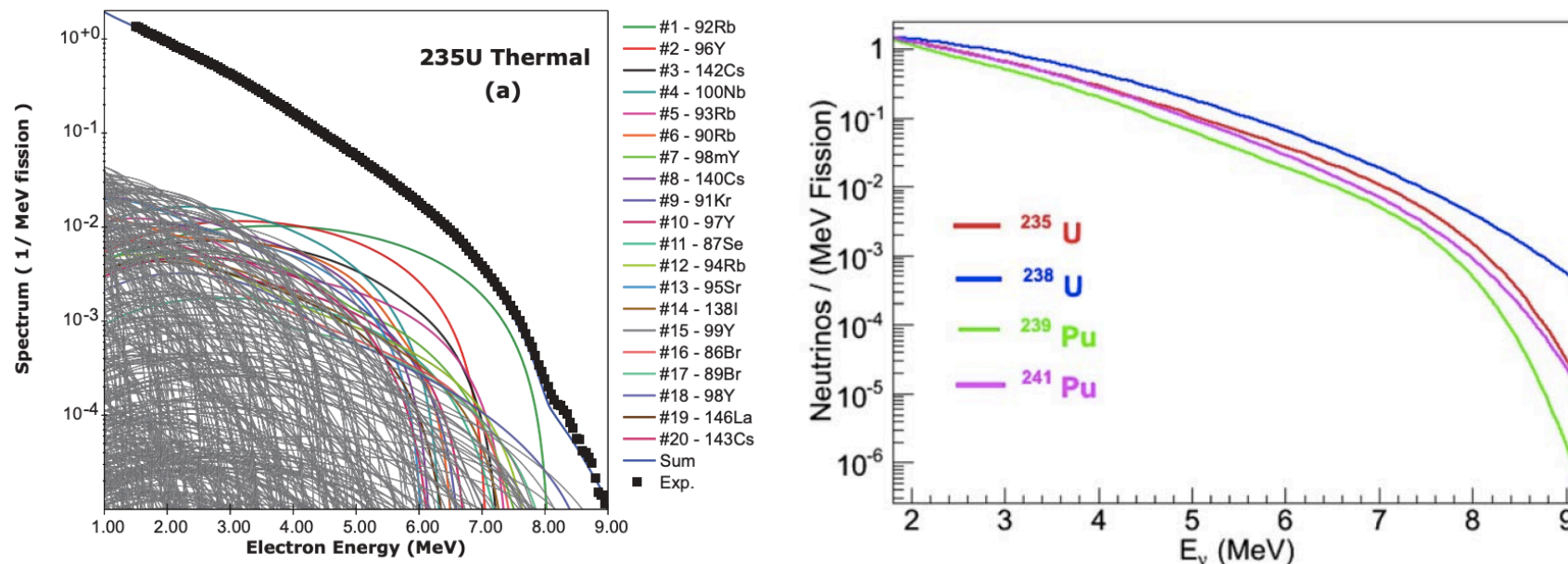
Réacteurs de recherche: ^{235}U



Détection : Réaction β inverse (IBD)



Prédiction : Modèle de Huber-Mueller depuis 2011

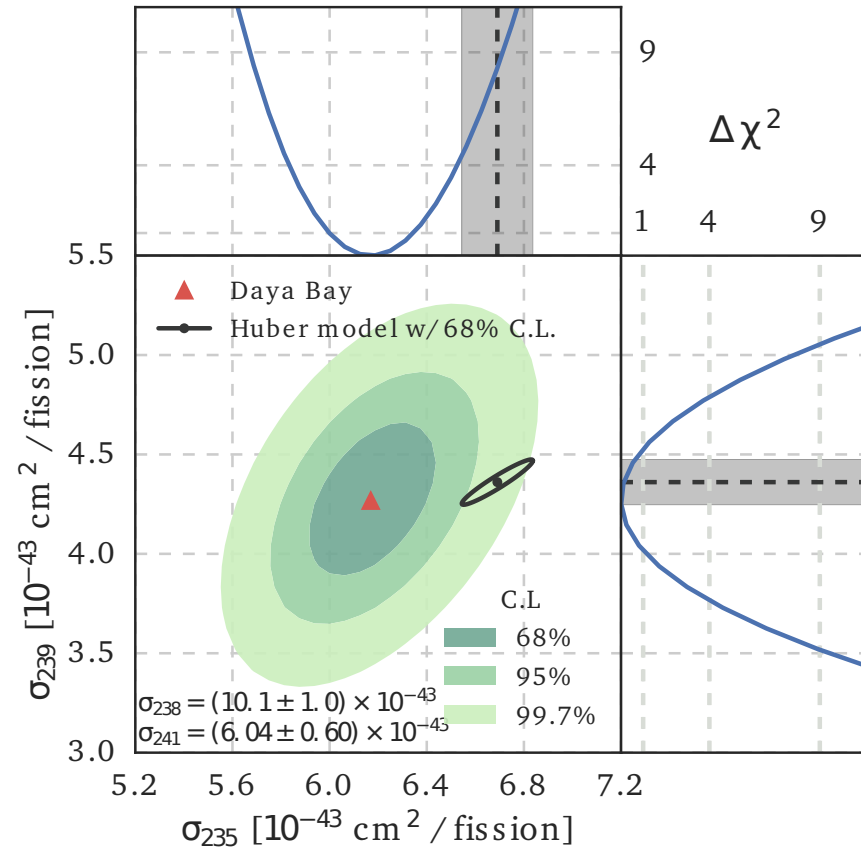


A. A. Sonzogni et al., Phys. Rev. C91, 011301 (2015)

Physique de basse énergie
 $\sim [0-10]$ MeV

DERNIÈRES MESURES AUPRÈS DE RÉACTEURS

Phys.Rev.Lett. 118 (2017) Daya Bay Collaboration



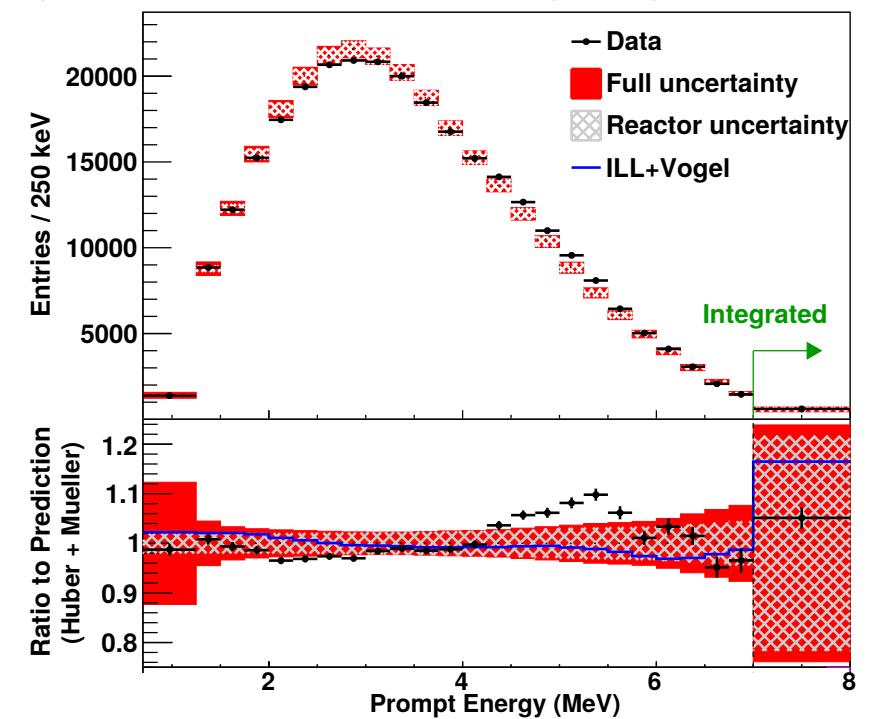
→ **Norme**

Déficit confirmé par des mesures précises

Double Chooz, Reno, Daya Bay (réacteurs industriels)

Déficit serait uniquement porté par l' ^{235}U (Daya Bay)

Phys.Rev.Lett. 116 (2016) Daya Bay Collaboration



Forme du spectre ←

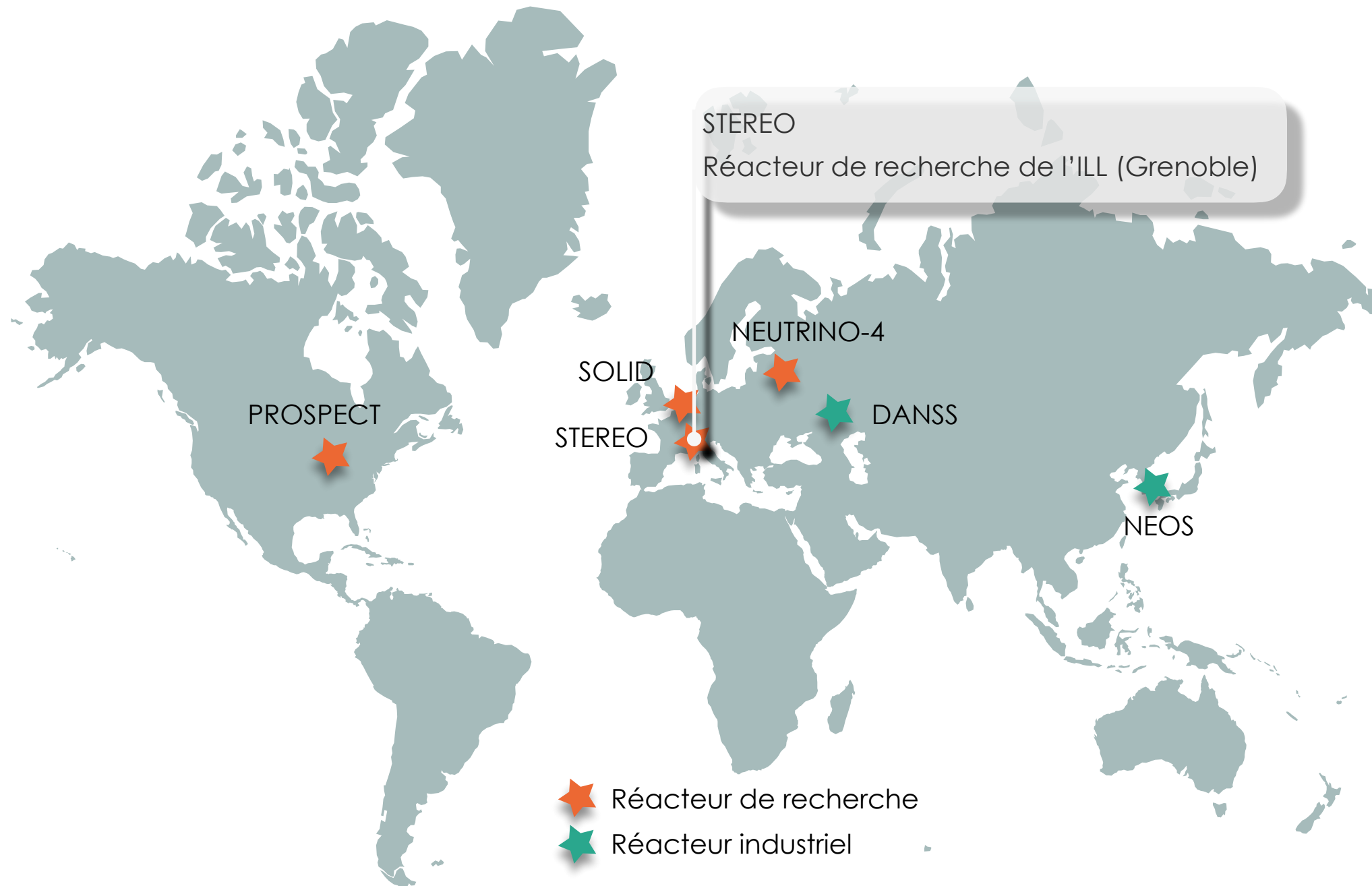
Désaccord avec la prédiction (excès à ~5MeV : *bump*)

Besoin de mesures pour :

Confirmer/rejeter l'hypothèse du neutrino stérile

Contraindre le spectre des antineutrinos de réacteurs

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL MONDIAL



Différentes technologies :

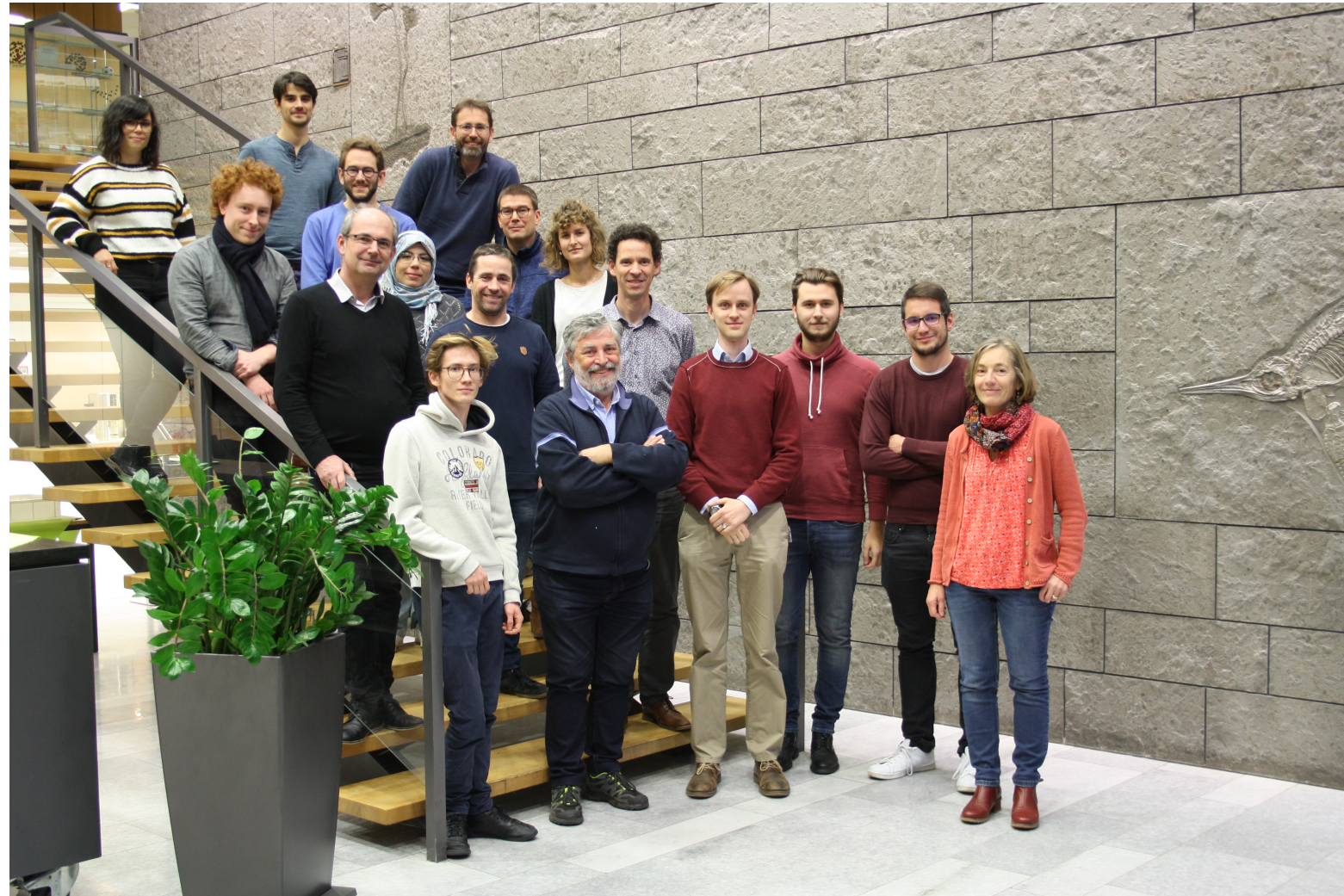
Scintillateurs liquides VS scintillateurs plastiques (segmentation)

Dopage au Gd ou Li (réduction bruits de fond)

LA COLLABORATION STEREO



Détecteur situé à Grenoble (« en province »)

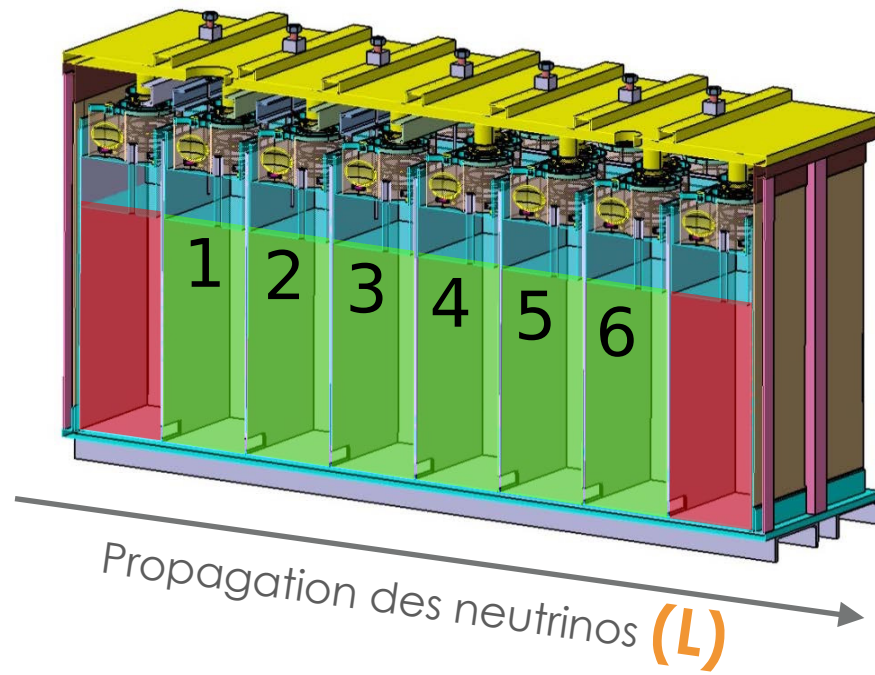


Collaboration internationale : CEA (Saclay), LPSC (Grenoble), MPIK (Heidelberg), LAPP (Annecy)

Chef de collaboration : David Lhuillier (CEA, IRFU)

~20 personnes

L'EXPÉRIENCE STEREO



$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(E_{\bar{\nu}_e}, L) = 1 - \sin^2(2\theta_{new}) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{new}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_{\bar{\nu}_e} [\text{MeV}]}\right)$$

► 1. Test de l'hypothèse d'un neutrino stérile

- ✓ Indépendant de la prédiction

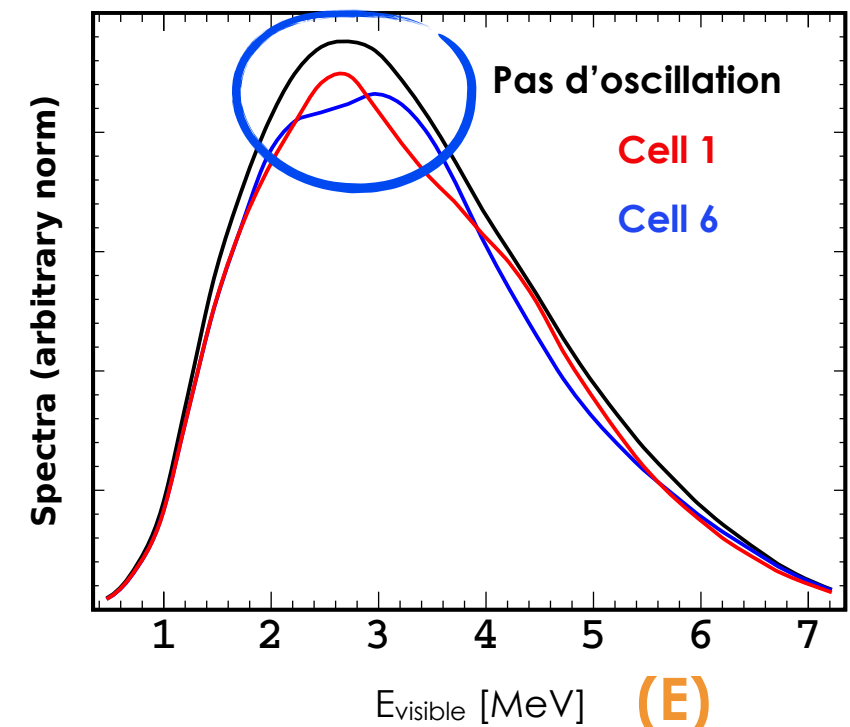
► 2. Forme du spectre

- ✓ Spectre associé à l'isotope ^{235}U
- ✓ Test de l'excès à 5 MeV

► 3. Norme absolue

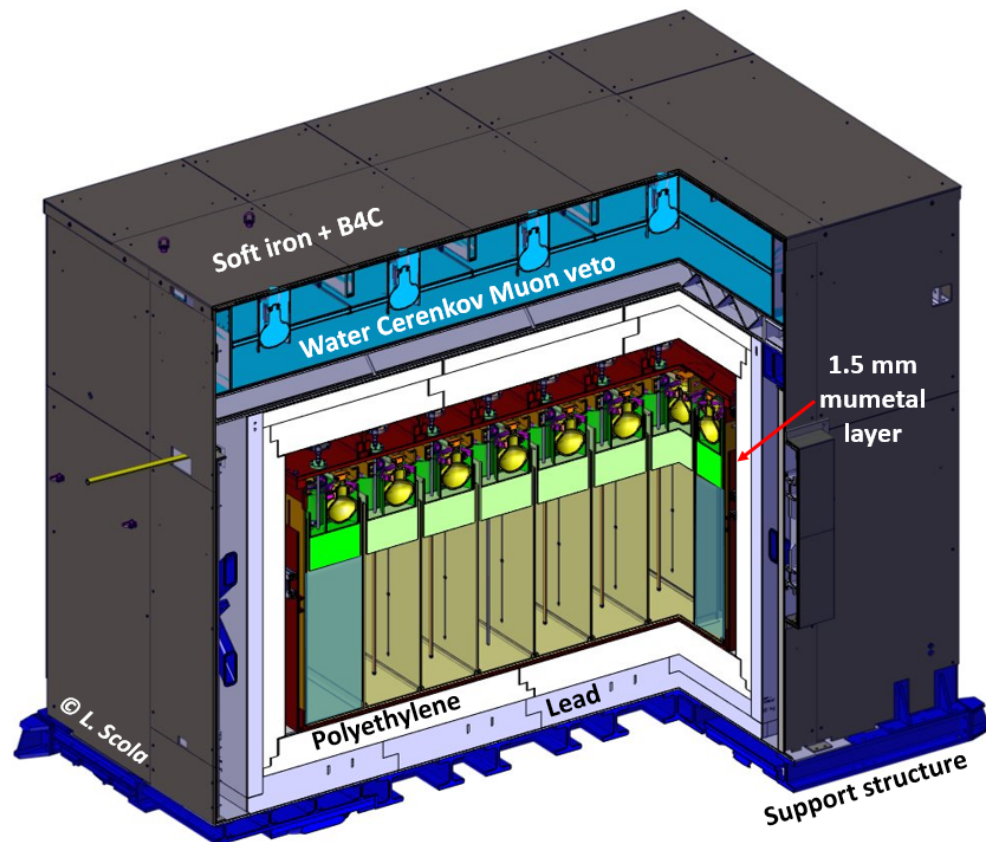
- ✓ Confirmer/infirmer le déficit pour un flux provenant de l'isotope d' ^{235}U

Résolution
en énergie !

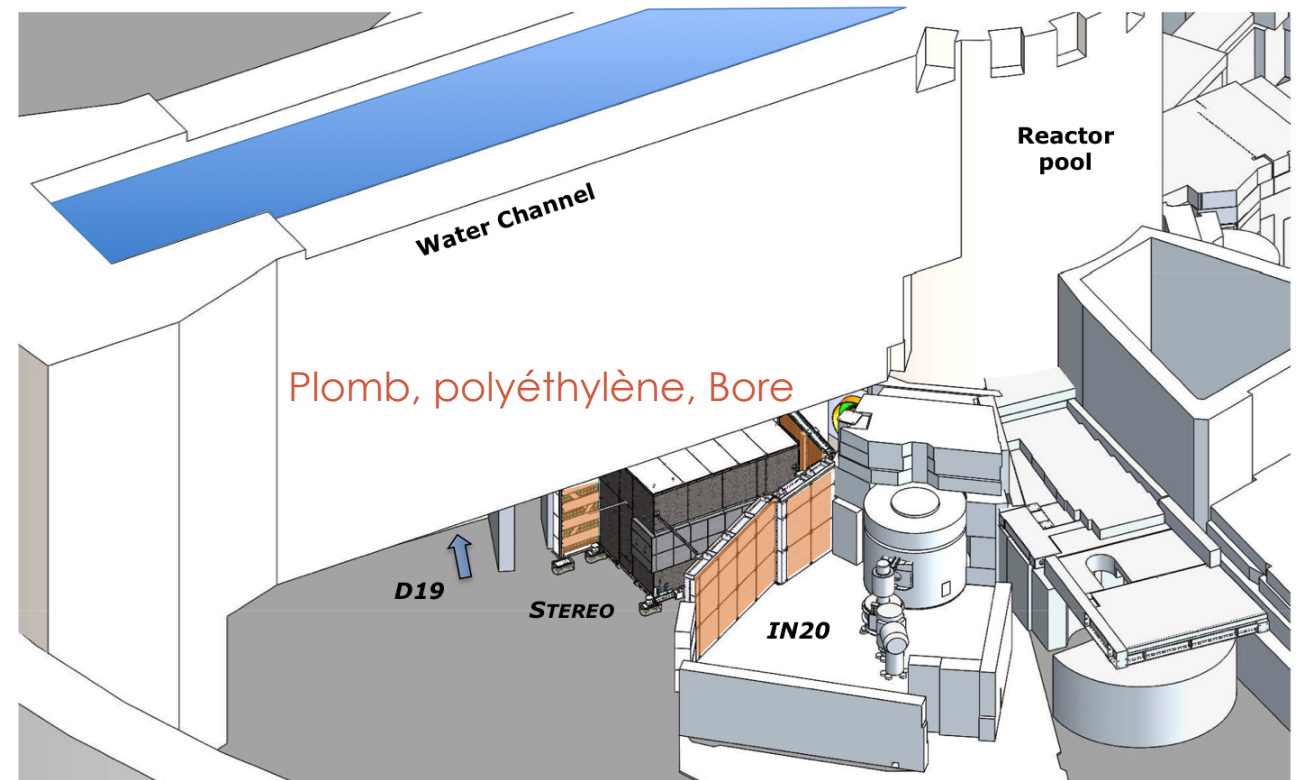


L'EXPÉRIENCE STEREO : SITE EXPÉRIMENTAL

- ✓ Coeur **compact** (40 cm \varnothing) \lll $L_{oscillation} \sim 3.2$ m
- ✓ **Hautement enrichi ^{235}U** (93%)
- ✓ Mesure à **courte distance** :
 $9.4 \text{ m} < L < 11.2 \text{ m}$
- ✓ **Cycles de fonctionnement** (ON) de 50 jours
2.5 cycles par an



Réacteur de recherche de l'ILL (~58 MWth)

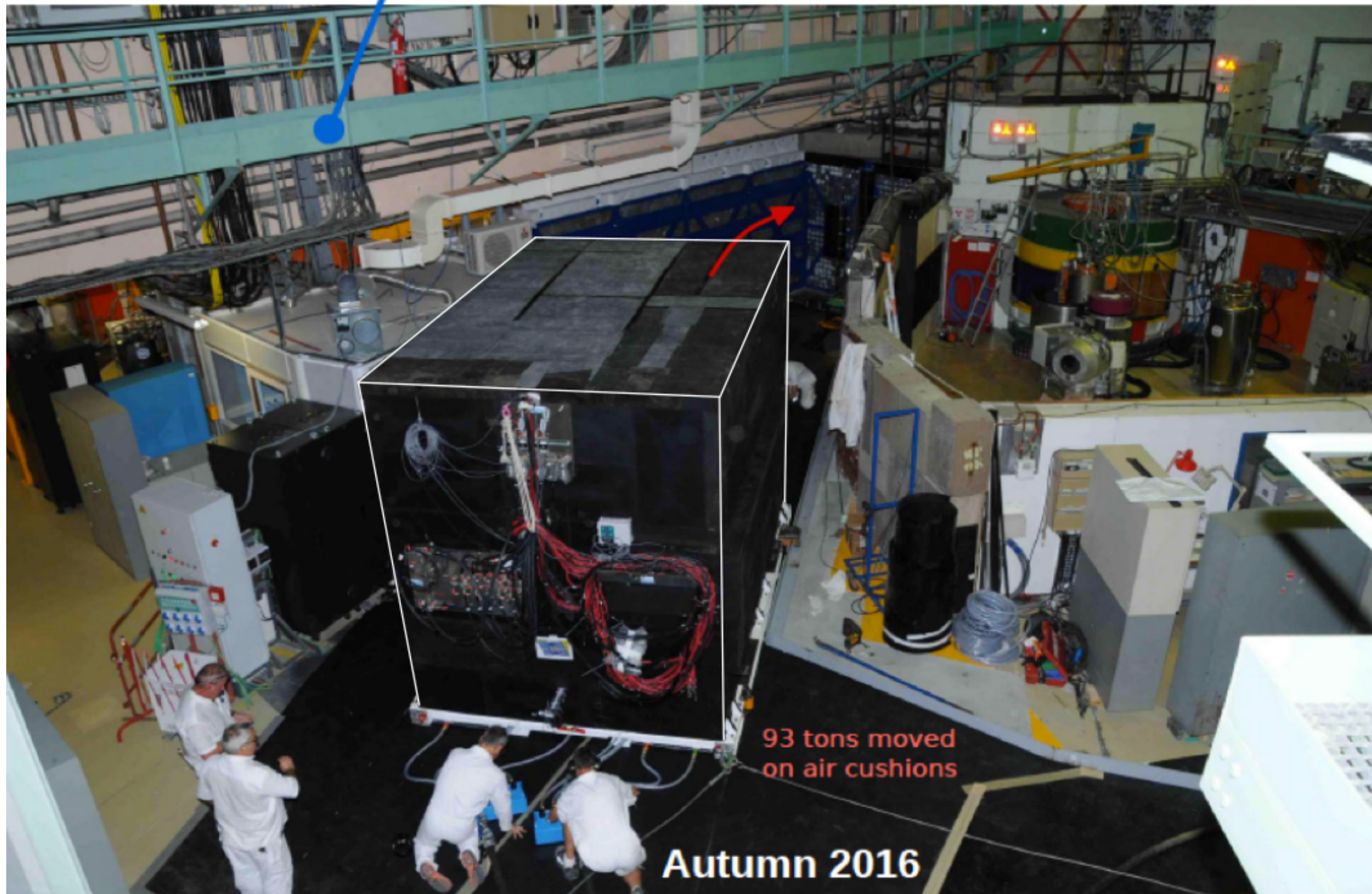


Défi majeur : discrimination du bruit de fond

- **Fonctionnement du réacteur**, expériences voisines : γ , n
→ Plomb, polyéthylène, Bore
- **Expérience de surface** (15 m.w.e.), faible protection contre les gerbes atmosphériques : μ , n, p, γ
→ Vêto (cerenkov), polyéthylène
→ **Mesuré pendant les périodes d'arrêt du réacteur (OFF)**

L'EXPÉRIENCE STEREO : SITE EXPÉRIMENTAL

Water channel
15 mwe overburden



L'EXPÉRIENCE STEREO : SENSIBILITÉ

Longueur d'oscillation vers le stérile ~ 3.2 m @ 3 MeV

STEREO placé au 3ème développement

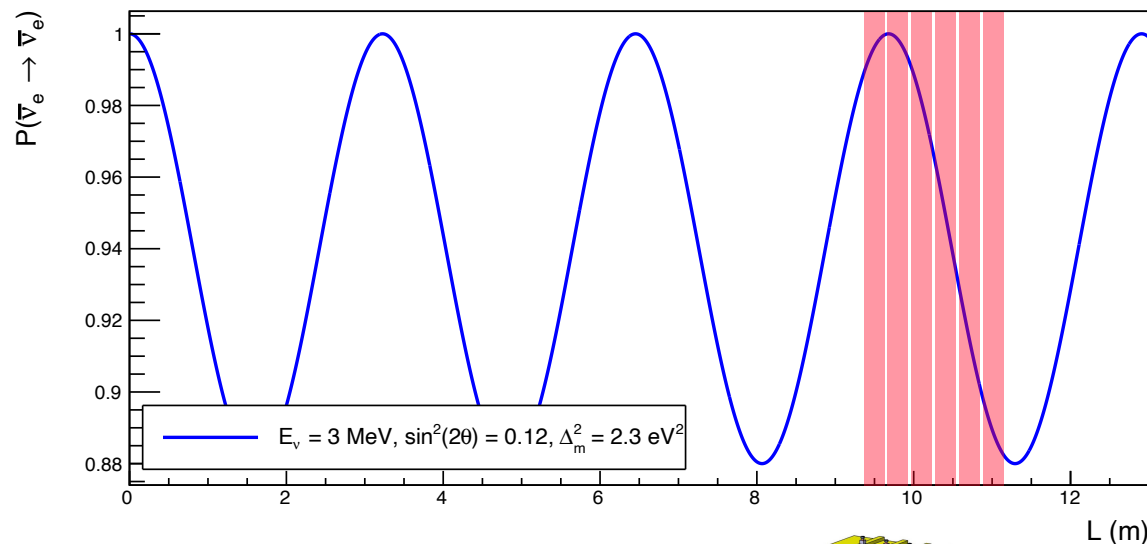
► Résolution en distance :

✓ taille cellule $\lll L(\text{osc})$

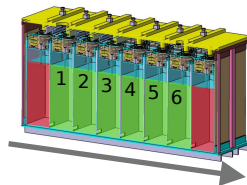
► Résolution en énergie :

► $< 10\%$ à 1 MeV

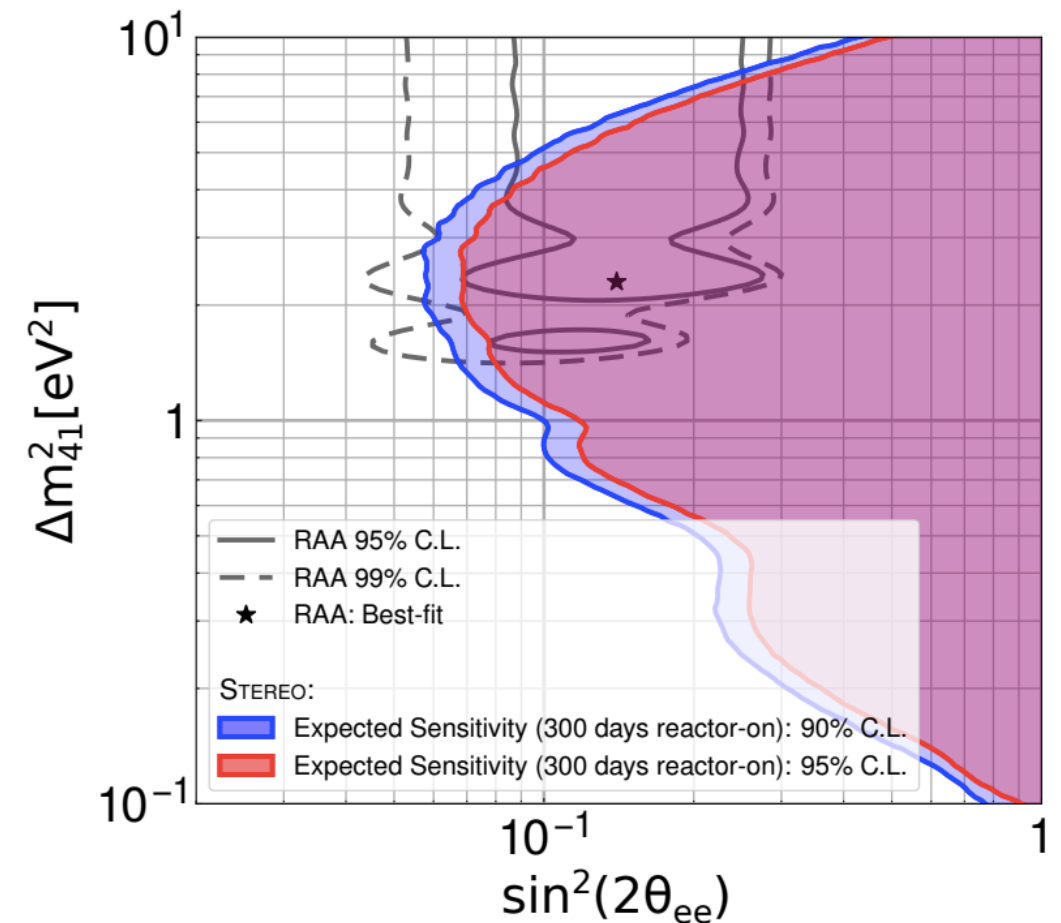
► $\sim 1\%$ incertitude de l'échelle en énergie



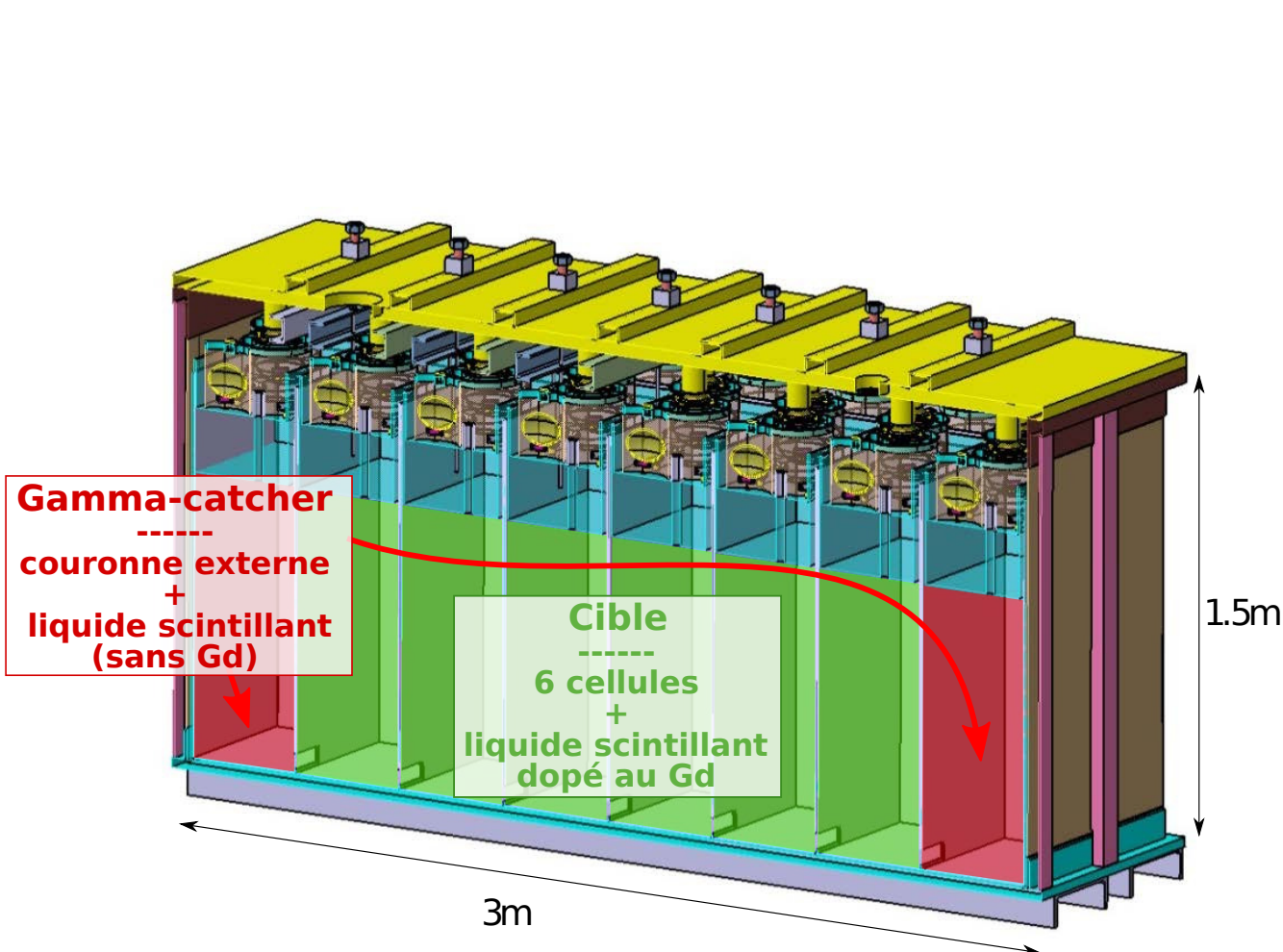
STEREO
6*40 cm



Sensibilité : Recouvrement de la RAA (anomalie des antineutrinos de réacteurs) avec 300 jours de données



L'EXPÉRIENCE STEREO : DÉTECTEUR INTERNE



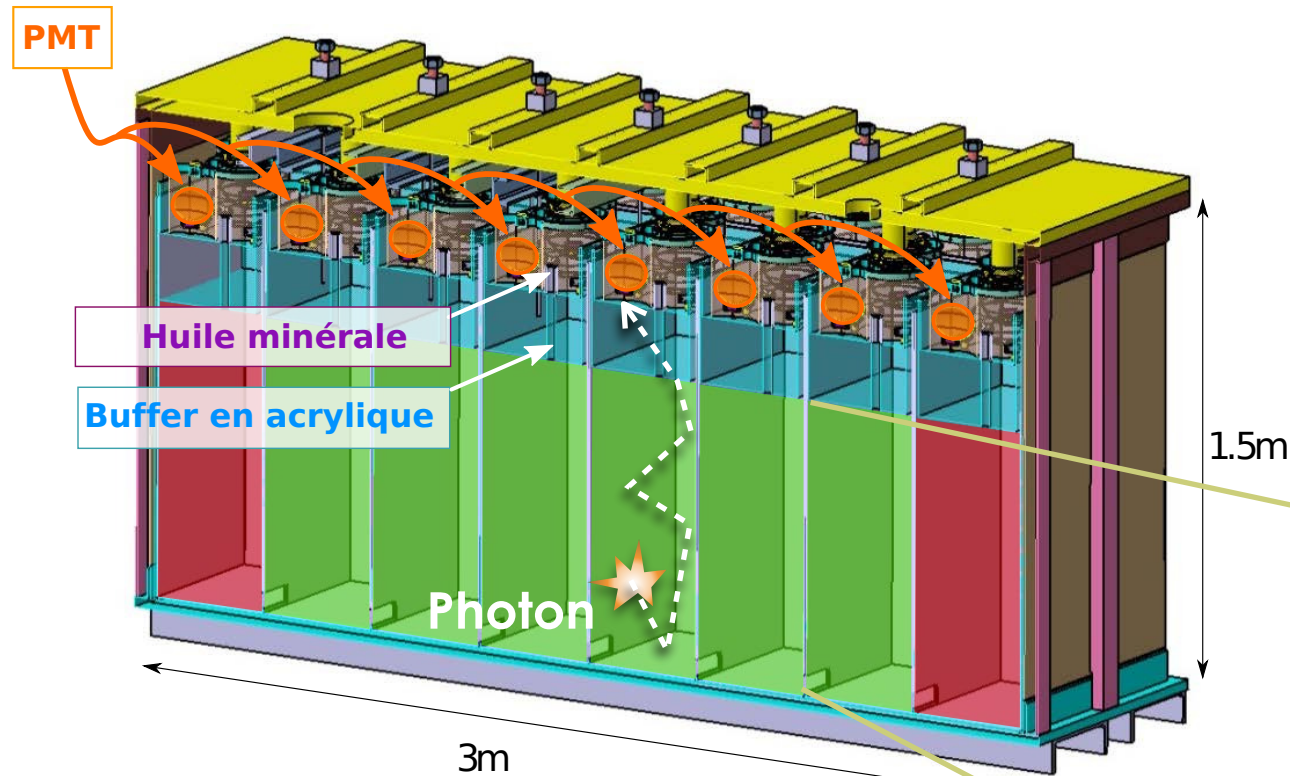
IBD dans la **Cible** : $\bar{\nu}_e + p \longrightarrow e^+ + n$

- Détection dans un scintillateur liquide
 - ✓ Bon rendement lumineux
(résolution E ~9%@1 MeV)
 - ✓ Pulse Shape Discrimination (discrimination bruit)
- Sélection IBD : dopage Gd (détection du n)
 - ✓ Capture n-Gd (~8 MeV), n-H (2.2 MeV)

Gamma-catcher :

- ✓ Énergie e^+ : 2γ (511 keV)
- ✓ Énergie n-Gd : $\sim 3\gamma$
- ✓ Vêto contre le bruit de fond

L'EXPÉRIENCE STEREO : DÉTECTEUR INTERNE

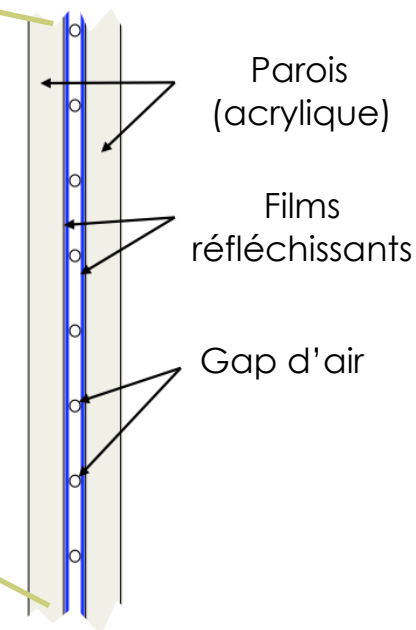


Collection de lumière

- Lumière réfléchi le long des parois
- 4 photomultiplicateurs par cellule, placés en haut

Parois réfléchissantes

- Phase-I : **variations des fuites de lumière**
- Phase-II : **stable**



L'EXPÉRIENCE STEREO : RÉPONSE DÉTECTEUR

Étalonnage : sources γ et n

Source	^{68}Ge	^{124}Sb	^{137}Cs	^{54}Mn	^{65}Zn	^{60}Co	^{24}Na	AmBe
Énergie raies γ (MeV)	0.511	0.603	0.662	0.835	1.11	1.17	1.37	2.22 (H(n, γ))
	0.511	1.69	-	-	-	1.33	2.75	4.43

chaque semaine

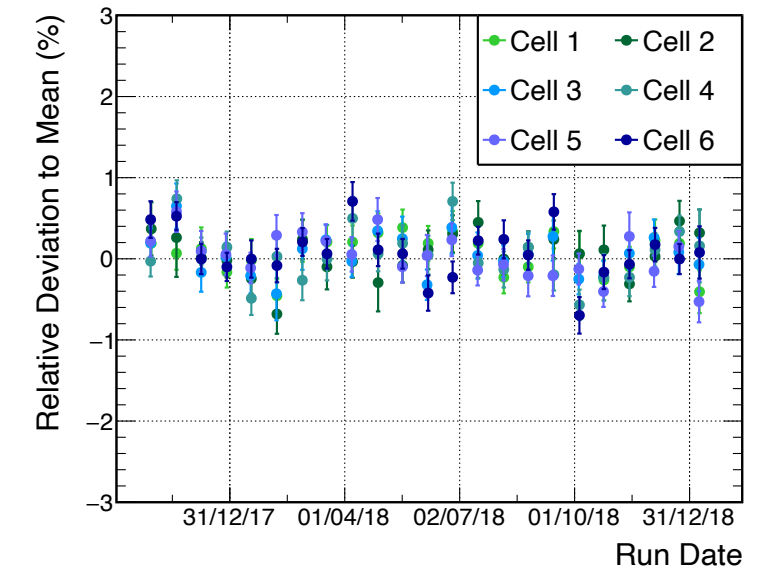
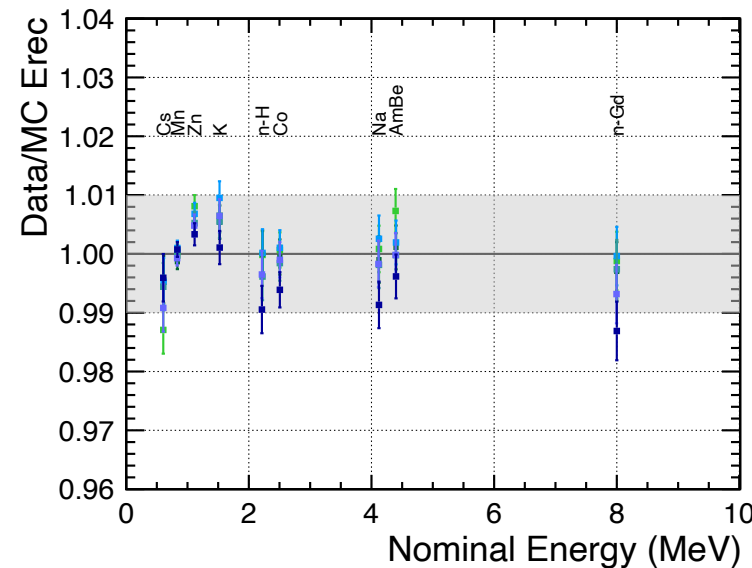
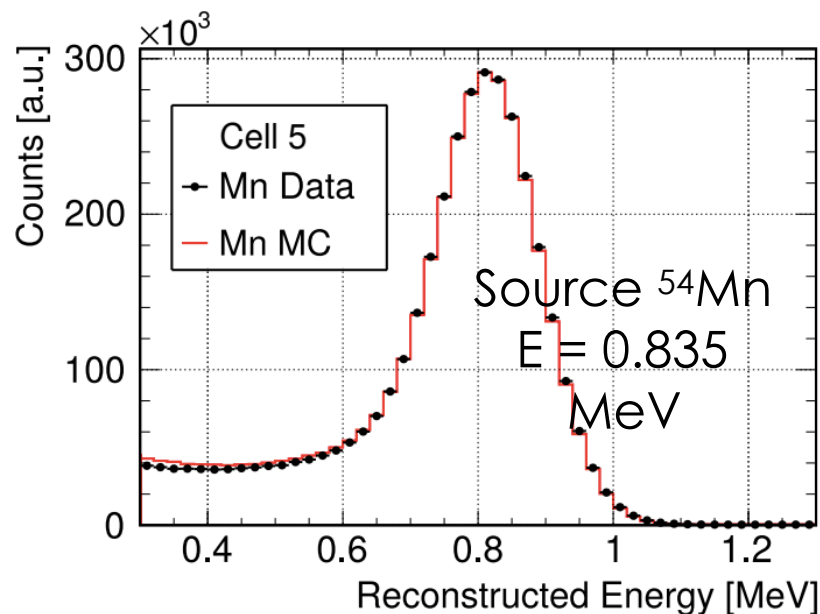
Simulation Géant 4

Reproduit physique, géométrie, matériaux, réponse du scintillateur, modèle optique, électronique

✓ Accord en charge données / MC < %

✓ Différentes mesures de l'énergie (sources) + spectre continu du Bore12

✓ Suivi en temps de l'énergie reconstruite (2.2 MeV n-H)



Les écarts entre D/MC, entre cellules et dans le temps, permettent l'évaluation des **incertitudes systématiques sur l'échelle en énergie (~1%)**

NON-LINÉARITÉS DU LIQUIDE SCINTILLANT

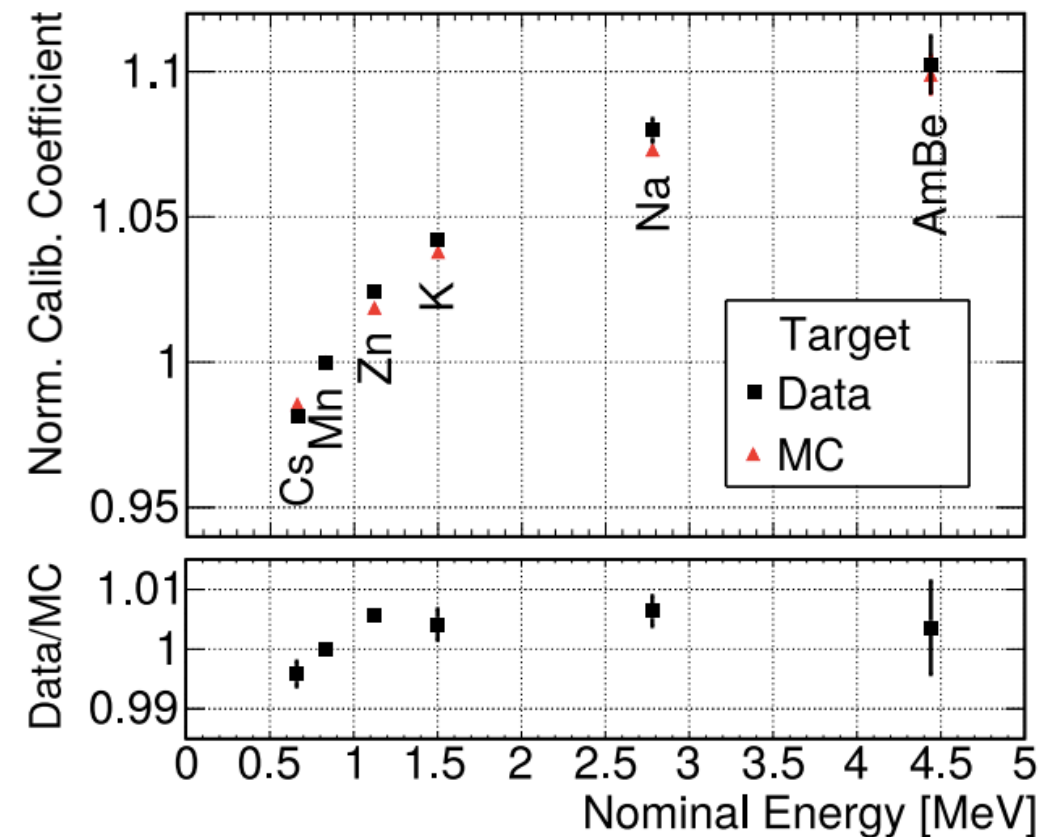
Phénomène de quenching à haut dE/dx

- Intrinsèque au scintillateur
- Baisse du rendement lumineux pour les faibles dépôts d'énergie
- Modèle de Birk décrit la déviation au régime linéaire :

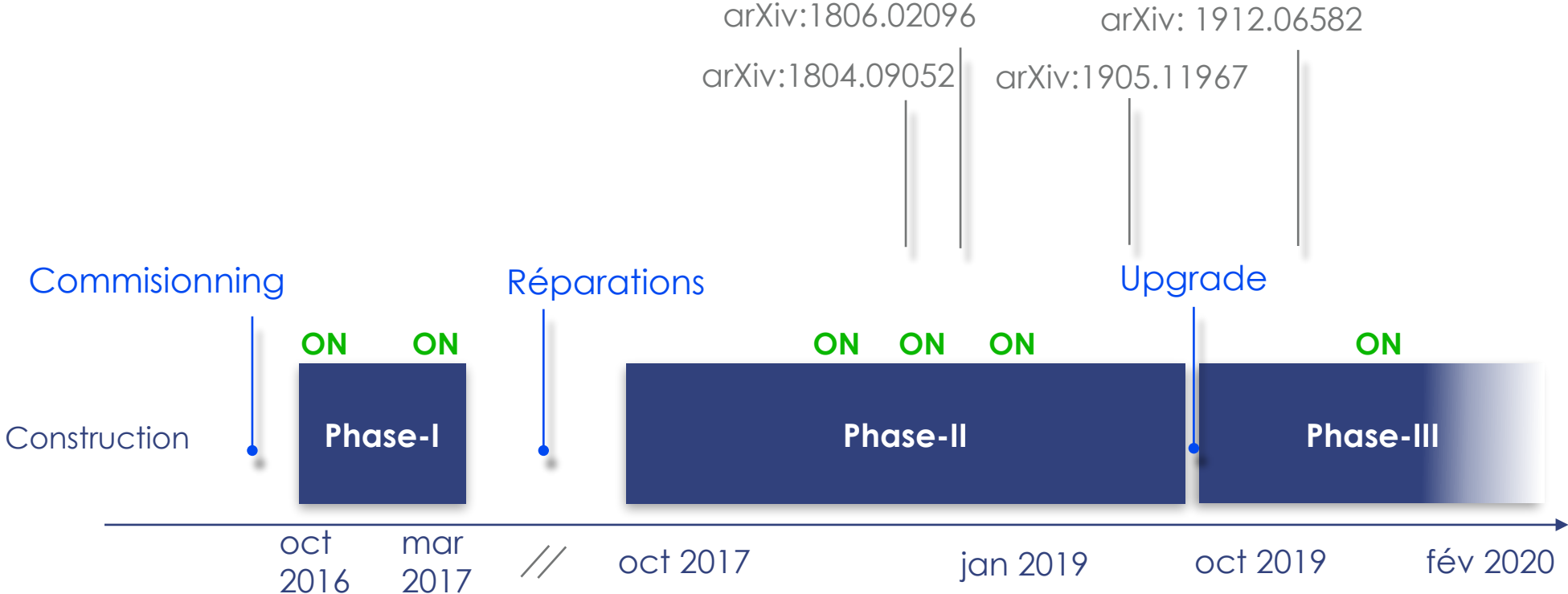
$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + k_B \frac{dE}{dx}}$$

Ajustement (« tuning ») du MC

$$k_B = (0.096 \pm 0.007) \text{ mm/MeV}$$



CALENDRIER

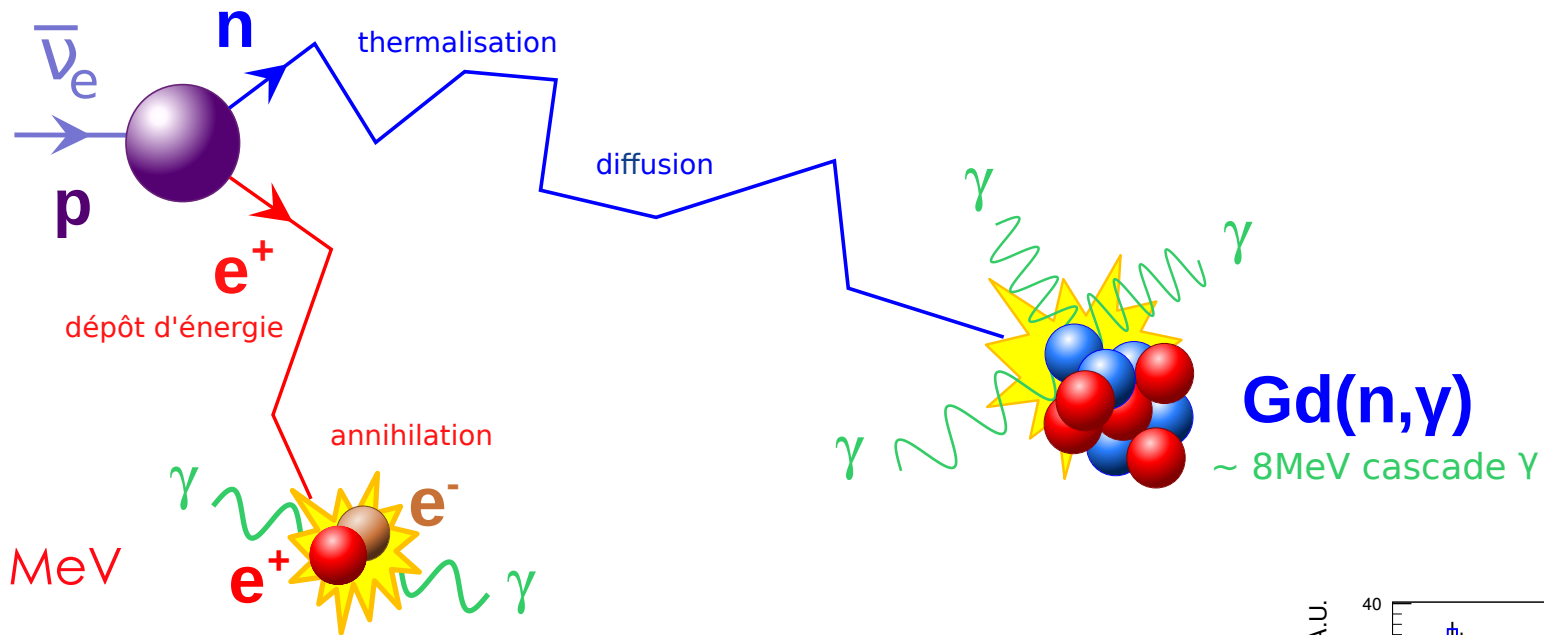


Période analysée et présentée
aujourd'hui (arXiv: 1912.06582)

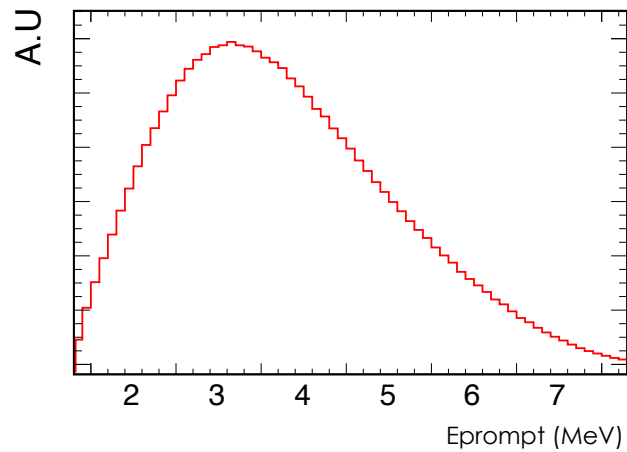
179 jours ON

235 jours OFF

SÉLECTION DU SIGNAL NEUTRINO



$$E_{\text{neutrino}} = E_{\text{prompt}} + 0.78 \text{ MeV}$$



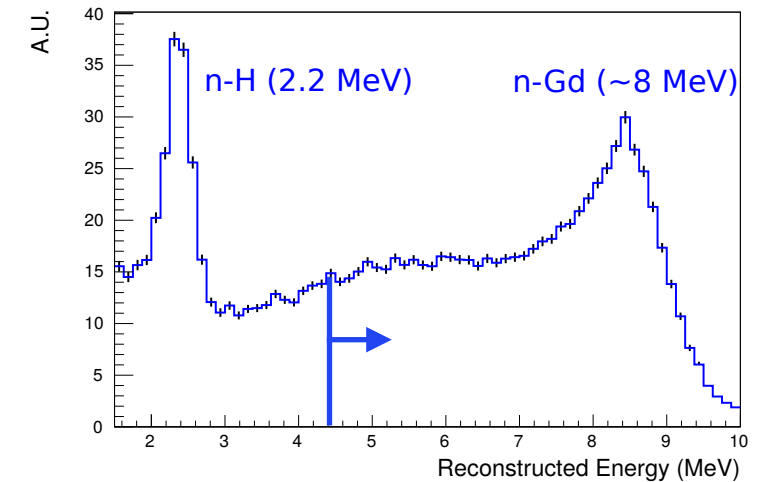
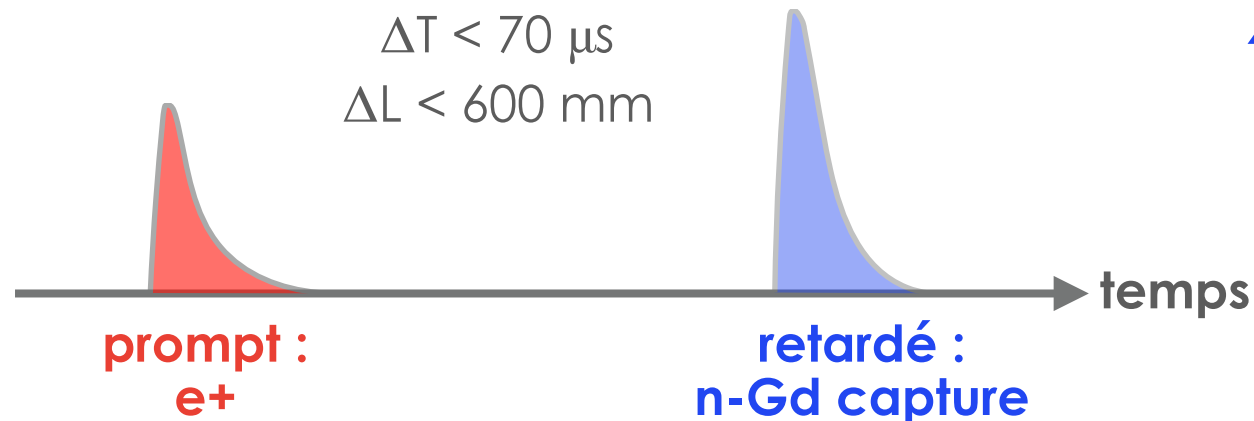
$$1.5 \text{ MeV} < E_{\text{prompt}} < 8 \text{ MeV}$$

corrélation temps-espace



$$\Delta T < 70 \mu\text{s}$$

$$\Delta L < 600 \text{ mm}$$



$$4.5 \text{ MeV} < E_{\text{retardé}} < 10 \text{ MeV}$$

REJET DES BRUITS DE FOND

★ ★ → 2 événements dans une fenêtre de 70 μ s

Bruit accidentel

- Sélections neutrinos (E, temps, distance)

✓ Mesuré avec des fenêtres en temps décalées

Bruit corrélé

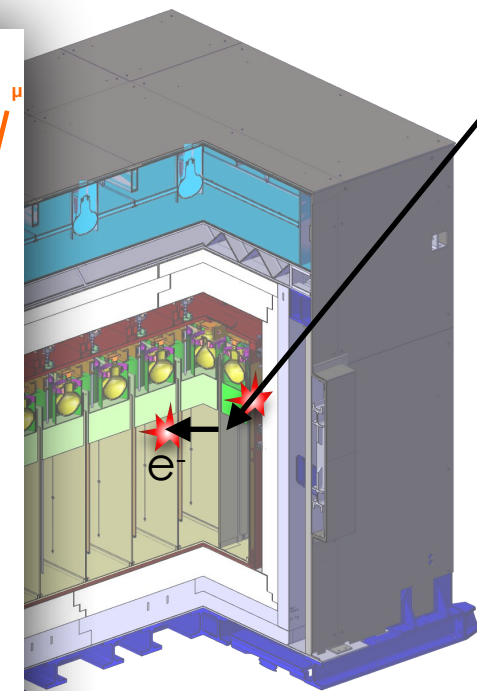
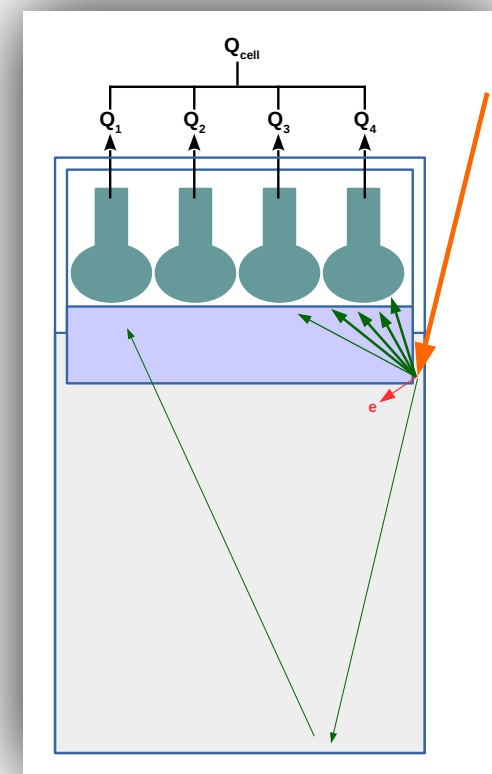
- Vêto à muons
- Isolations en temps après un μ : $> 100 \mu$ s
- Isolations en temps de la paire (2 événements seulement)
- Dépôt de lumière homogène sur les 4 PMT (asymétrie)
- Coupure en temps ($> 2 \mu$ s)

✓ Mesuré en réacteur-OFF

• Expériences voisines ou cosmiques : γ, n, p, μ

Spallation : neutrons rapides

Désintégrations de muons



$\mu \rightarrow e \bar{\nu}_e \nu_\mu$
 $\tau = 2.2 \mu$ s

Type	#	Requirement for passing cut	$a_{\text{cut}}/\%$
Energy	1	$1.625 \text{ MeV} < E_{\text{prompt}}^{\text{detector}} < 8.125 \text{ MeV}$	89.2
	2	$4.5 \text{ MeV} < E_{\text{delayed}}^{\text{detector}} < 10.0 \text{ MeV}$	75.9
Coin- cidence	3	$2 \mu\text{s} < \Delta T_{\text{prompt-delayed}} < 70 \mu\text{s}$	95.5
	4	$\Delta X_{\text{prompt-delayed}} < 600 \text{ mm}$	99.3
Topology	5	$E_{\text{prompt}}^{\text{cell}} < \begin{cases} 1.0 \text{ MeV, neighbour cell} \\ 0.4 \text{ MeV, other cell} \end{cases}$	98.6
	6		99.6
	7	$E_{\text{delayed}}^{\text{Target}} > 1.0 \text{ MeV}$	97.9
Rejection of muon- induced back- ground	8	$\Delta T_{\text{muon-prompt}}^{\text{veto}} > 100 \mu\text{s}$	—
	9	$\Delta T_{\text{muon-prompt}}^{\text{detector}} > 200 \mu\text{s}$	—
	10	$\Delta T_{\text{before prompt}} > 100 \mu\text{s}$ and $\Delta T_{\text{after delayed}} > 100 \mu\text{s}$ for all events with $E_{\text{event}}^{\text{detector}} > 1.5 \text{ MeV}$	—
	11	$\frac{Q_{\text{PMT max, prompt}}}{Q_{\text{cell, prompt}}} < 0.5$	99.3

Acceptance du signal neutrino (~60%)

variations de 4% entre le premier bin et le dernier bin en énergie

Temps mort d'analyse (13.5%)

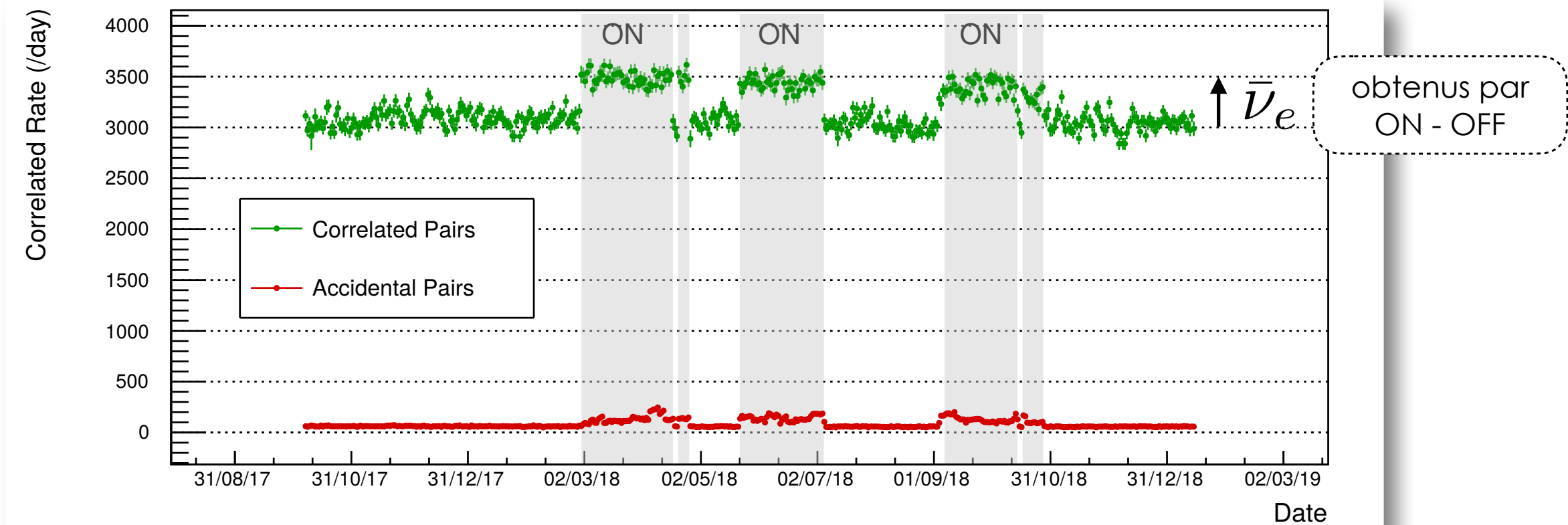
Muons dans le veto (8%)

Muons dans le détecteur (4.5%)

Évènements dans le détecteur (1.5%)

ÉVOLUTION DES TAUX

- Bruit **accidentel** < 200 paires /jour
- Bruit **corrélé** ~3000 /jour
- Taux de neutrinos attendus ~400 /jour

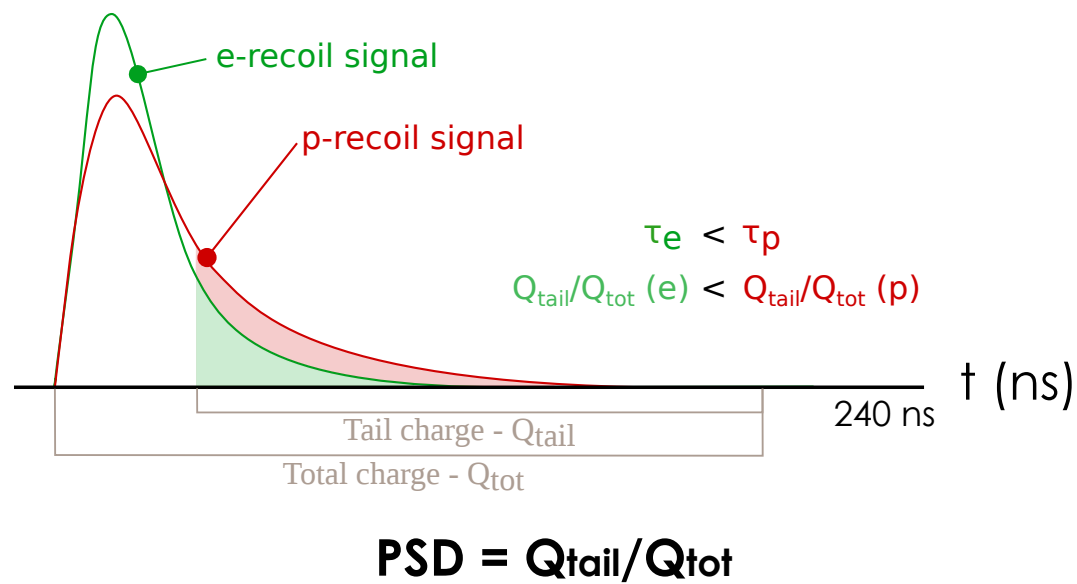


- L'expérience est **dominée par le bruit d'origine cosmique**, caractérisé grâce aux périodes de OFF
- Identification de particules pour réduire le bruit cosmique

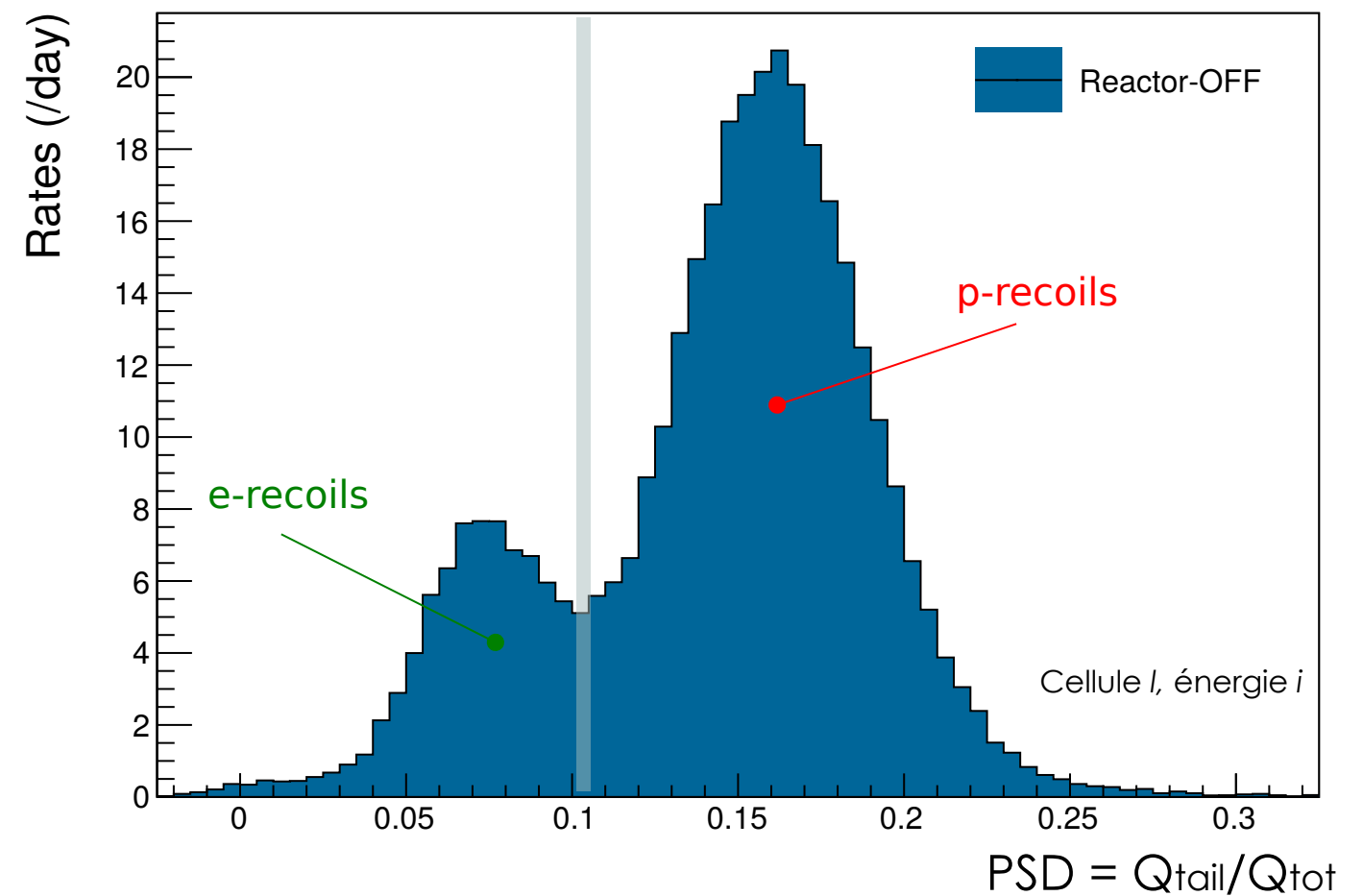
BRUITS DE FOND CORRÉLÉS : PSD

PSD = Pulse Shape Discrimination

Propriété du scintillateur liquide permettant de discriminer entre les **reculs de proton** et d'**électron** (basée sur la densité d'ionisation)

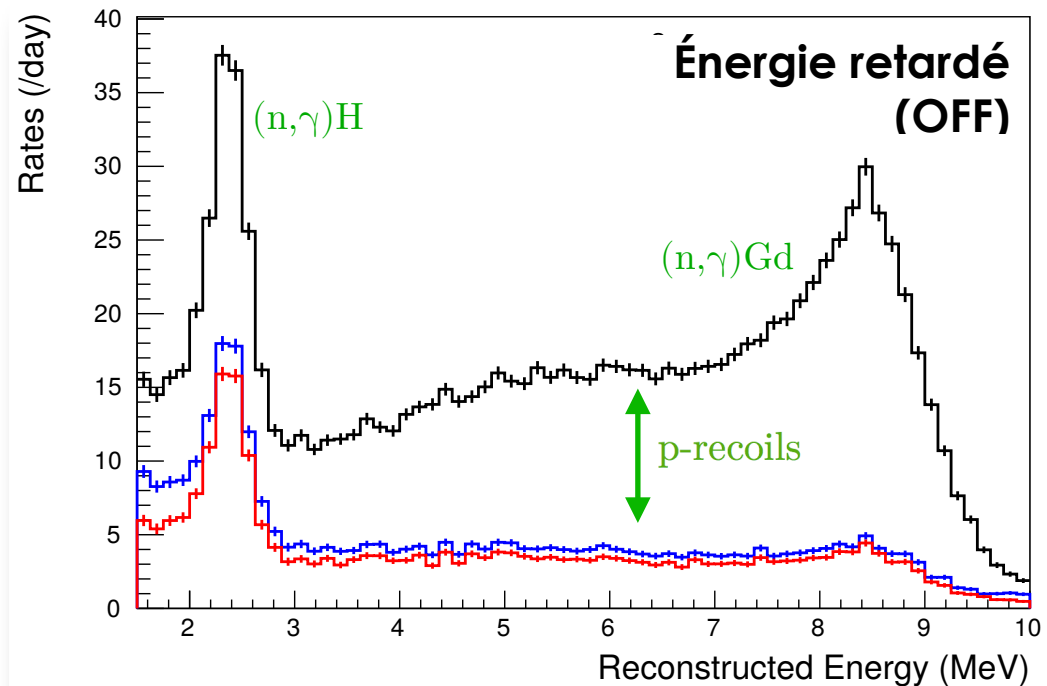
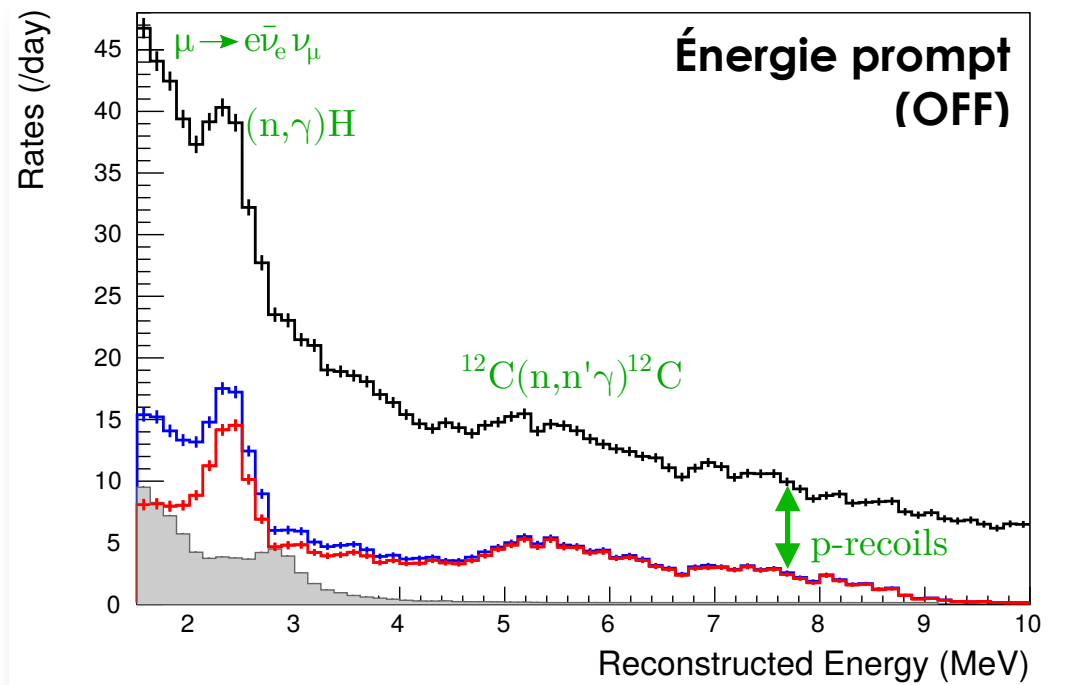


Bruit **corrélé** OFF : ~3000 /jour

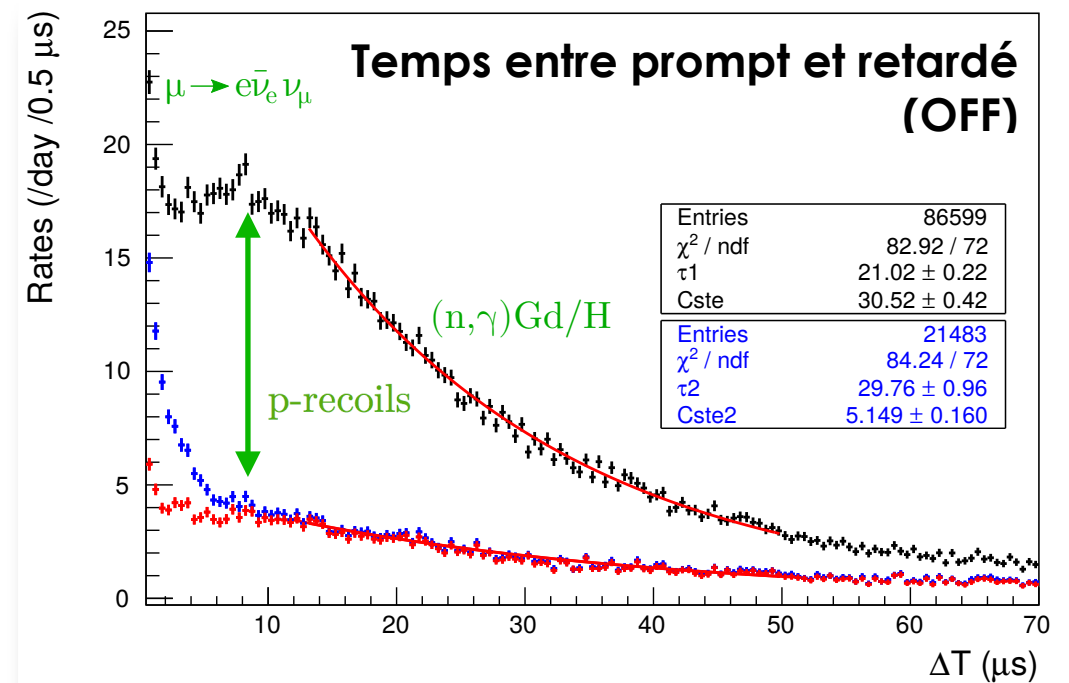


L'utilisation d'une coupure sur la PSD permet de caractériser le bruit de fond corrélé

BRUITS DE FOND CORRÉLÉS : CARACTÉRISATION



- +— **Candidats corrélés**
(sauf PSD et asymétrie)
- +— **Candidats corrélés, reculs d'électrons**
(PSD < 0.1)
- +— **Candidats corrélés, reculs d'électrons**
(PSD < 0.1 et asymétrie)



➤ **Bruit de fond :**

double captures n-H
diffusion sur noyaux de C
désintégrations de muons

➤ **~500 paires / jour**
(S/B ~0.9)

BRUITS DE FOND CORRÉLÉS : SOUSTRACTION

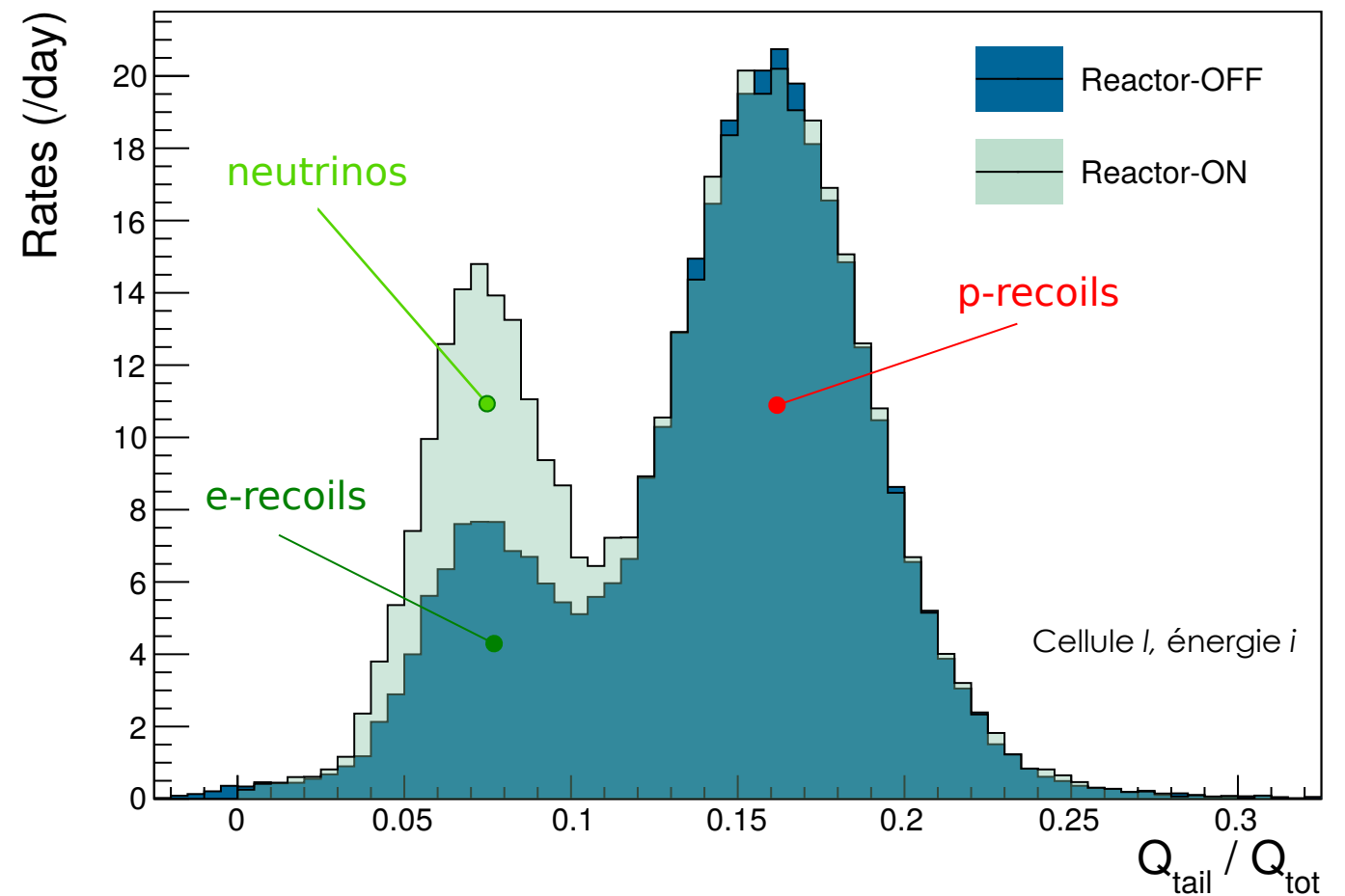
Neutrinos obtenus par soustraction statistique (pour chaque cellule et chaque bin en énergie)

Point clé de l'expérience :

Stabilité du bruit de fond entre ON et OFF

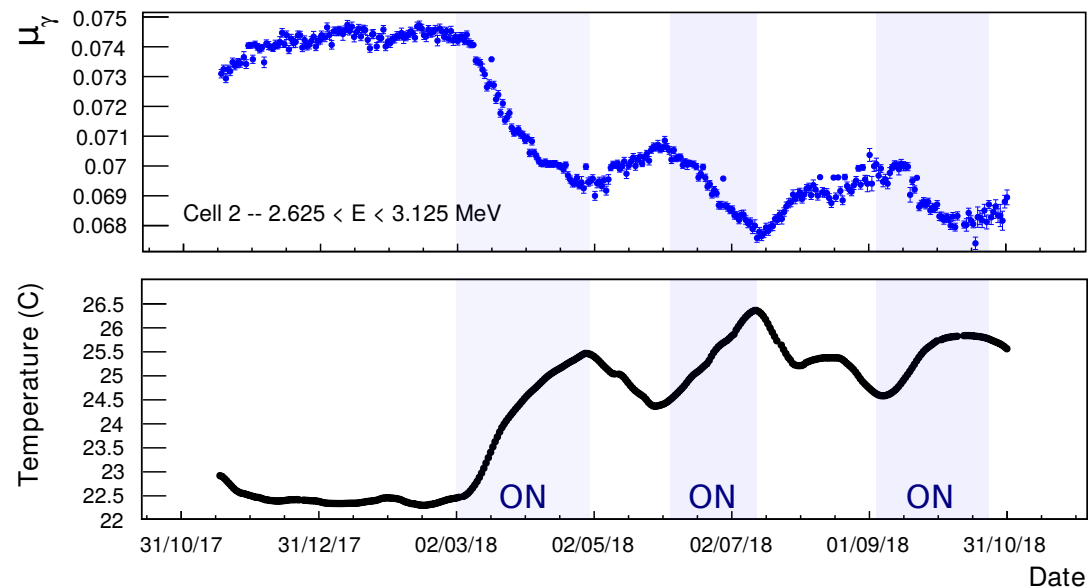
- 1 — Stabilité de l'observable PSD
- 2 — Stabilité des différents bruits de fond (norme, proportion relative)

Bruit **corrélé OFF** : ~3000 /jour Taux **ON** : ~3400 /jour

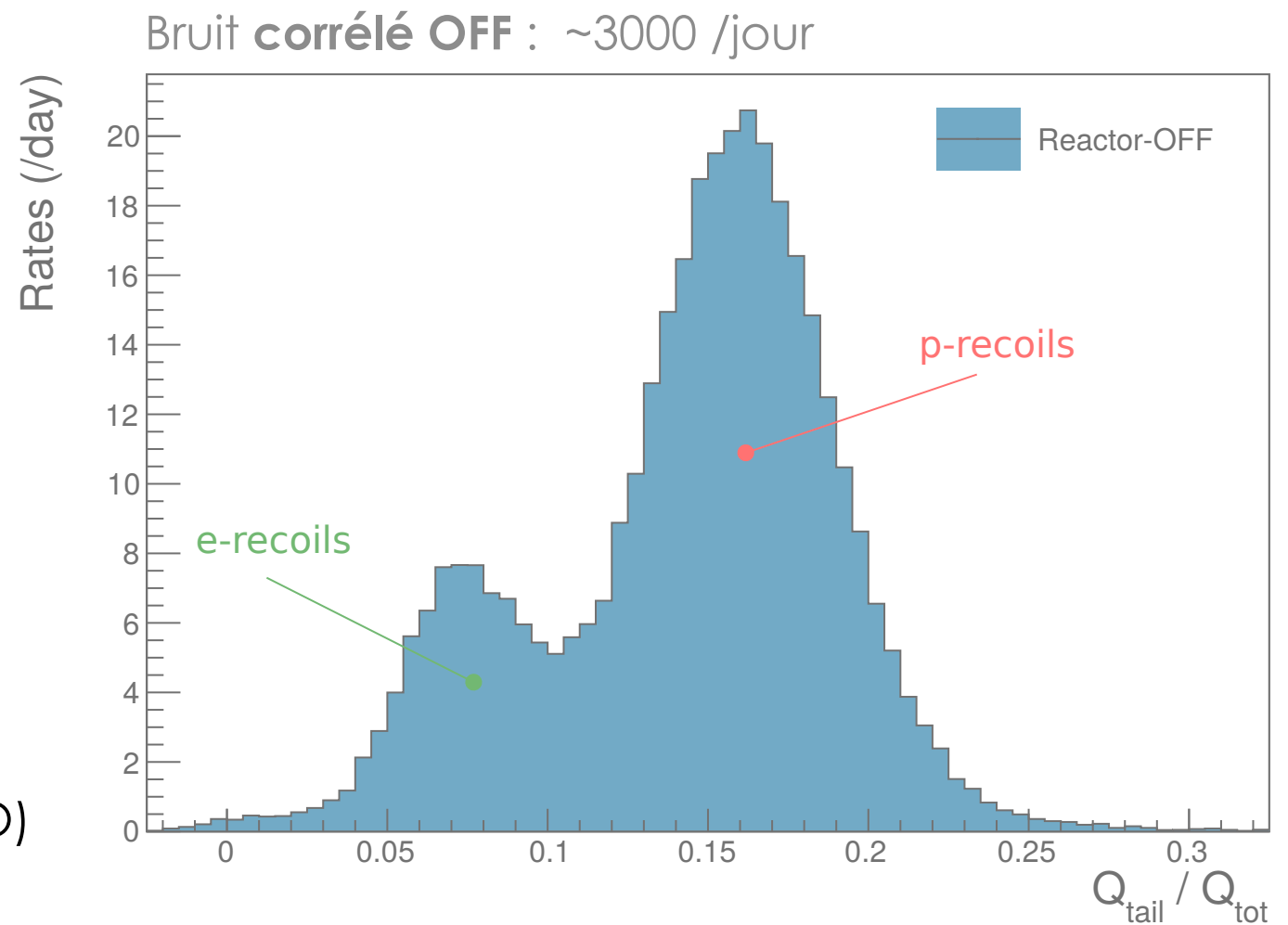
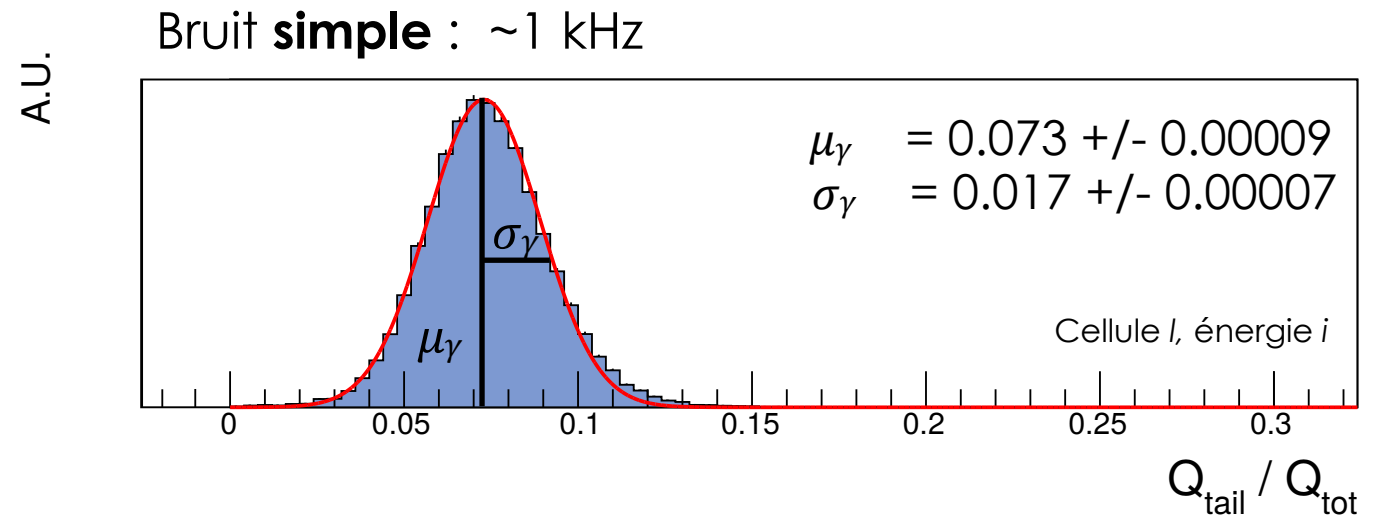


STABILITÉ DE LA PSD

- ▶ Suivi grâce aux événements simples γ (~ kHz)
- ▶ Forte corrélation à la température



- ▶ **Correction** de la PSD pour chaque jour, pour chaque cellule et bin en énergie + **validations (sources radioactives)**
- ▶ Considération importante pour des expériences futures utilisant la PSD (JUNO)



STABILITÉ DU BRUIT DE FOND (1/2)

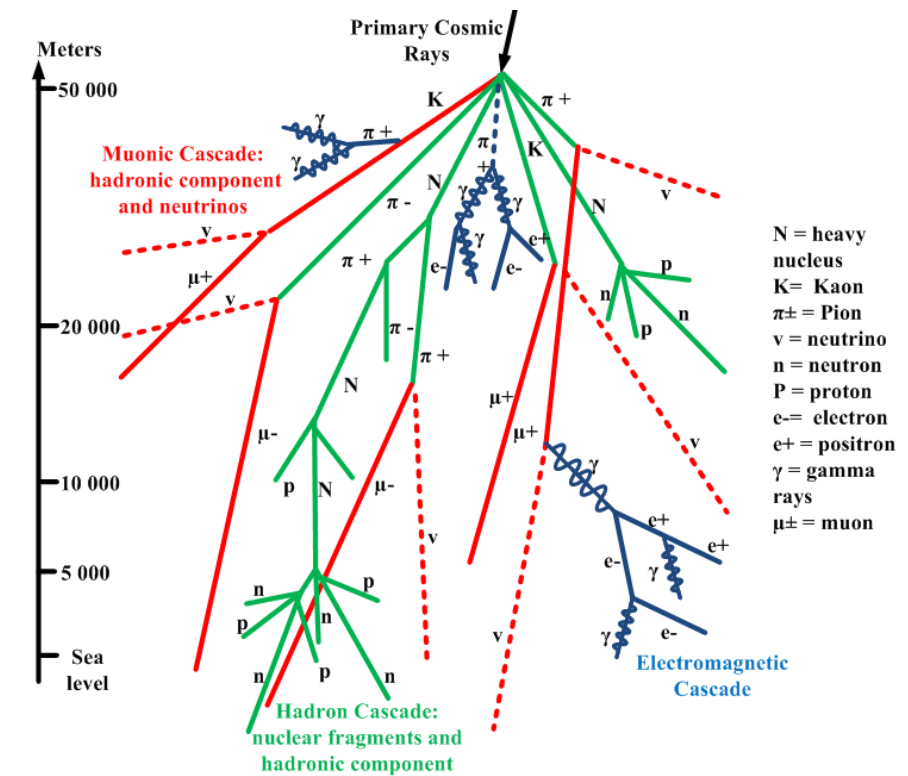
1) Stabilité en norme

Bruit d'origine cosmique est directement impacté par

- La **pression atmosphérique** (P)
- Le **niveau d'eau** (N) situé dans la piscine au dessus du coeur du réacteur

$$f_{\text{Pression atm.}} = (-0.60 \pm 0.02)\% \text{ hPa}^{-1}$$

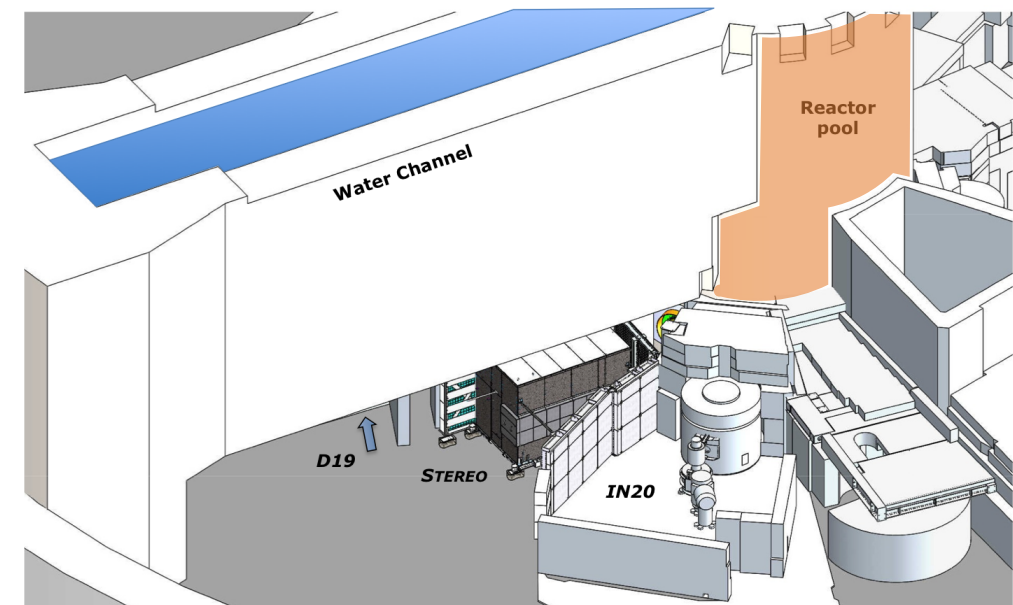
$$f_{\text{Niveau eau}} = (-0.14 \pm 0.02)\% \text{ m}^{-1}$$



Variations non négligeables entre ON et OFF :

$$\langle P_{\text{ON}} \rangle - \langle P_{\text{OFF}} \rangle = 10 \text{ hPa} \rightarrow \Delta R \sim 6\%$$

$$\langle N_{\text{ON}} \rangle - \langle N_{\text{OFF}} \rangle = 7 \text{ m} \rightarrow \Delta R \sim 1\%$$



STABILITÉ DU BRUIT DE FOND (2/2)

2) Stabilité en forme

OFF1 = basses pressions
OFF2 = hautes pressions $\Delta P = 10$ hPa

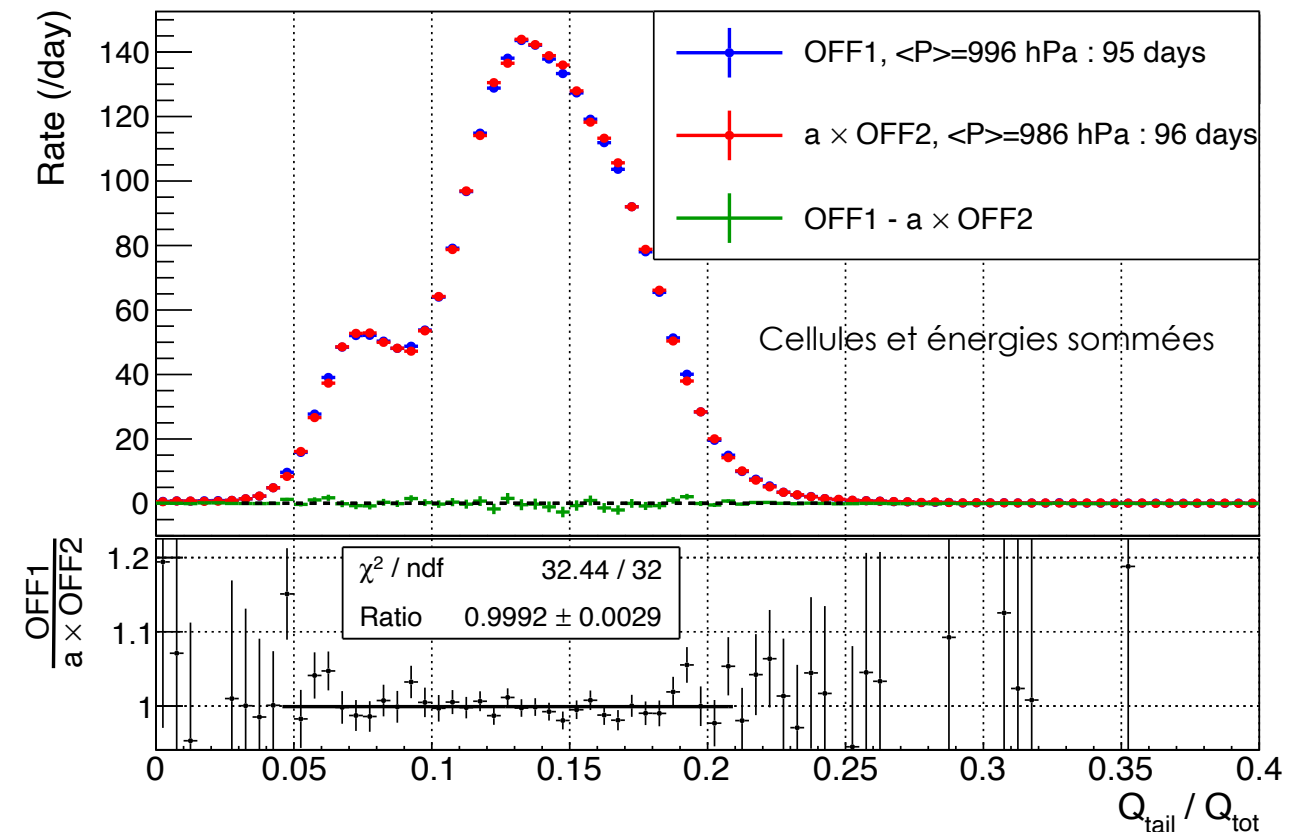
Ajustement par minimisation du
OFF1 avec le OFF2 \times constante a

$$\text{OFF1} = a \times \text{OFF2}$$

paramètre de normalisation
 $a = (93.3 \pm 0.26)\%$

Cohérent avec le coefficient trouvé:

$$f_{\text{Pression atm.}} = (-0.60 \pm 0.02)\% \text{ hPa}^{-1}$$



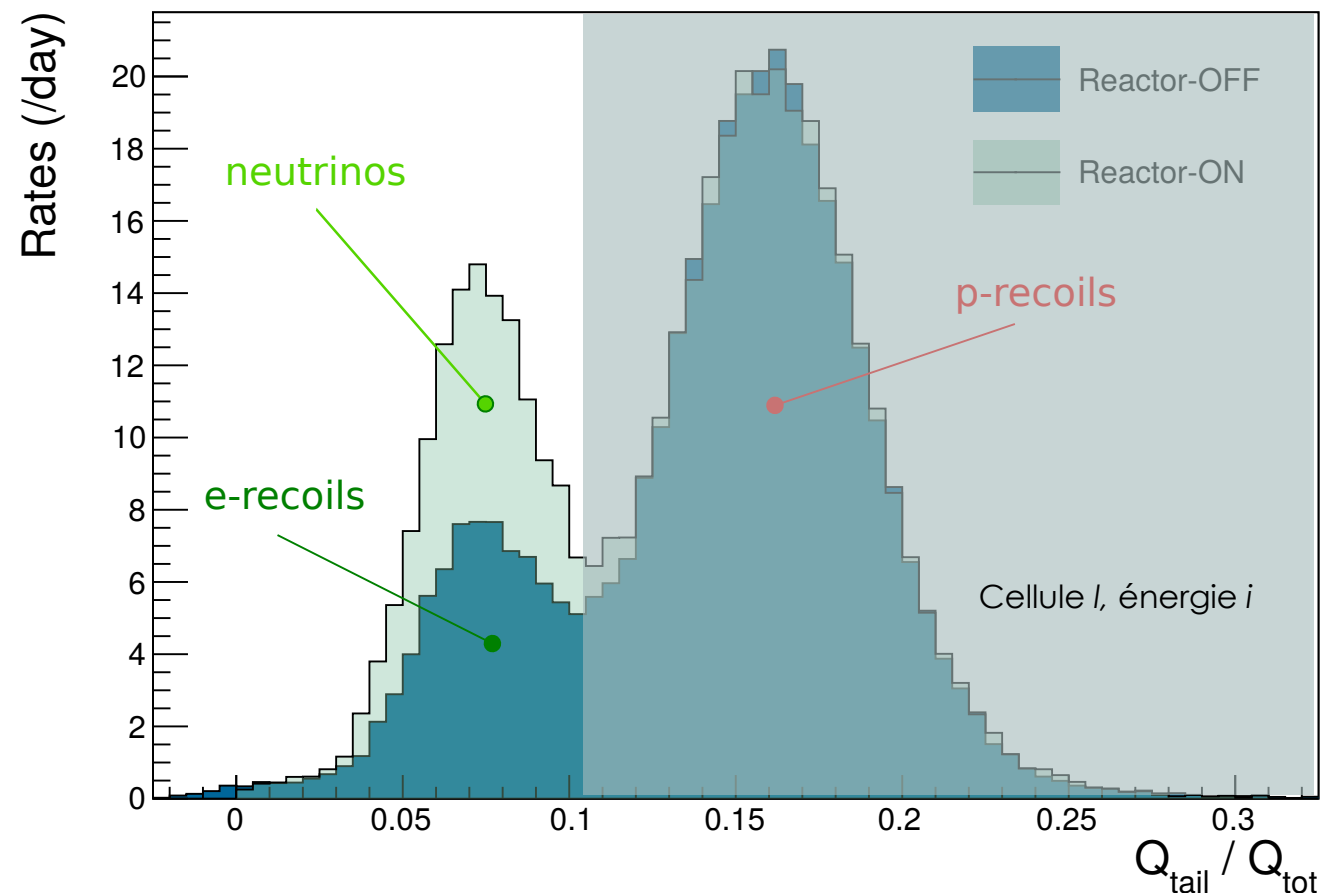
- ✓ Etudes répétées pour les variations du niveau d'eau et du temps, pour chaque cellule et chaque bin en énergie
- ✓ Stabilité de la forme de la PSD

EXTRACTION DU SIGNAL NEUTRINO

➤ Méthode habituelle : coupure PSD

- ✓ PSD corrigée, stabilité en forme
- ✓ ! Différence en norme : renormalisation du bruit de fond OFF pour le soustraire au ON
 - Propagation d'incertitudes systématiques non triviale
- ✓ ! Problème d'estimation d'efficacité du signal (non reproduit par la simulation)

➤ Nécessité d'imaginer une méthode différente

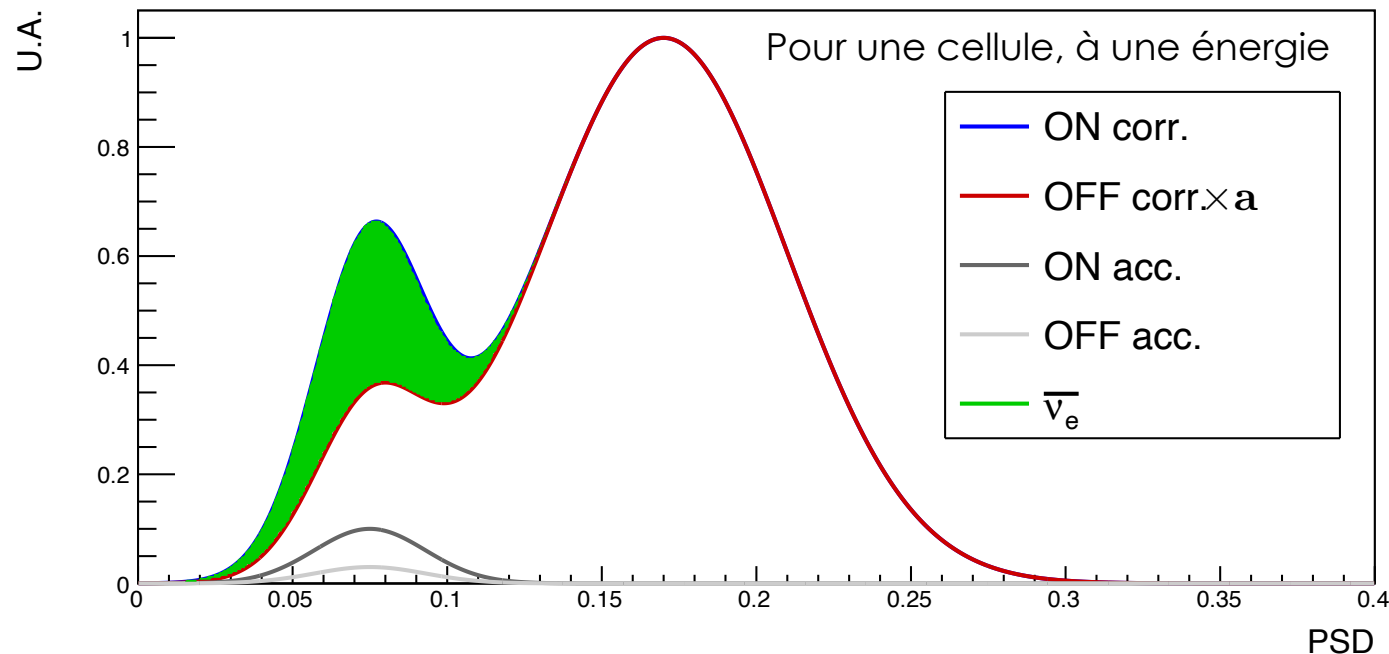


EXTRACTION DU SIGNAL NEUTRINO (MÉTHODE)

Méthode :

Ajustement simultané des distributions de PSD **corrigées** obtenues en **ON** et en **OFF**

$$\text{ON} = \mathbf{a} \times (\text{OFF} - \text{OFF}^{\text{Acc}}) + \mathcal{G}(\mathcal{A}, \mu, \sigma) + \text{ON}^{\text{Acc}}$$



Maximisation de vraisemblance \mathcal{L} dans chaque bin de PSD i :

$$\mathcal{L} = \prod_{i=0}^{N \text{ PSD bin}} \mathcal{P}(n_i; \nu_i(\theta)) = \prod_{i=0}^{N \text{ PSD bin}} \frac{\nu_i(\theta)^{n_i} e^{-\nu_i(\theta)}}{n_i!}$$

$\text{ON} \quad \mathbf{a} \times (\text{OFF} - \text{OFF}^{\text{Acc}}) + \mathcal{G}(\mathcal{A}, \mu, \sigma) + \text{ON}^{\text{Acc}}$

minimisation de $-2 \ln \mathcal{L}$

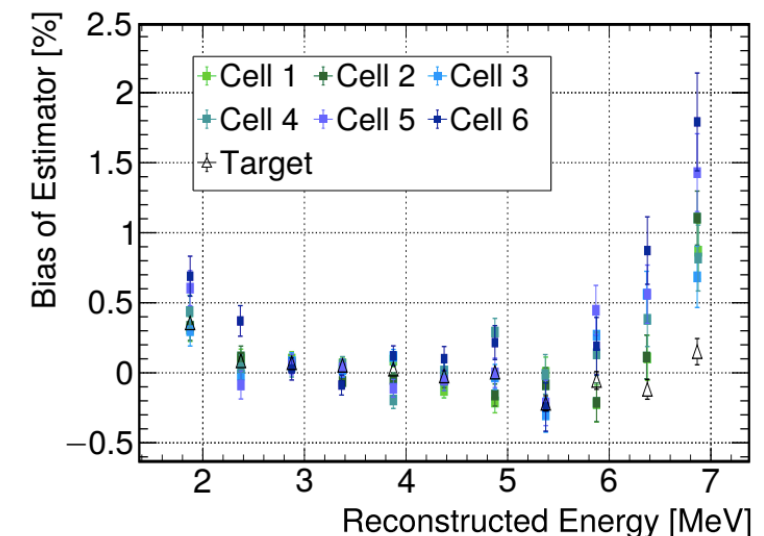
Avantages :

- ✓ Pas besoin de l'efficacité de la coupure PSD
- ✓ Paramètre \mathbf{a} englobe toute différence de normalisation du bruit de fond
- ✓ Erreurs données par l'ajustement

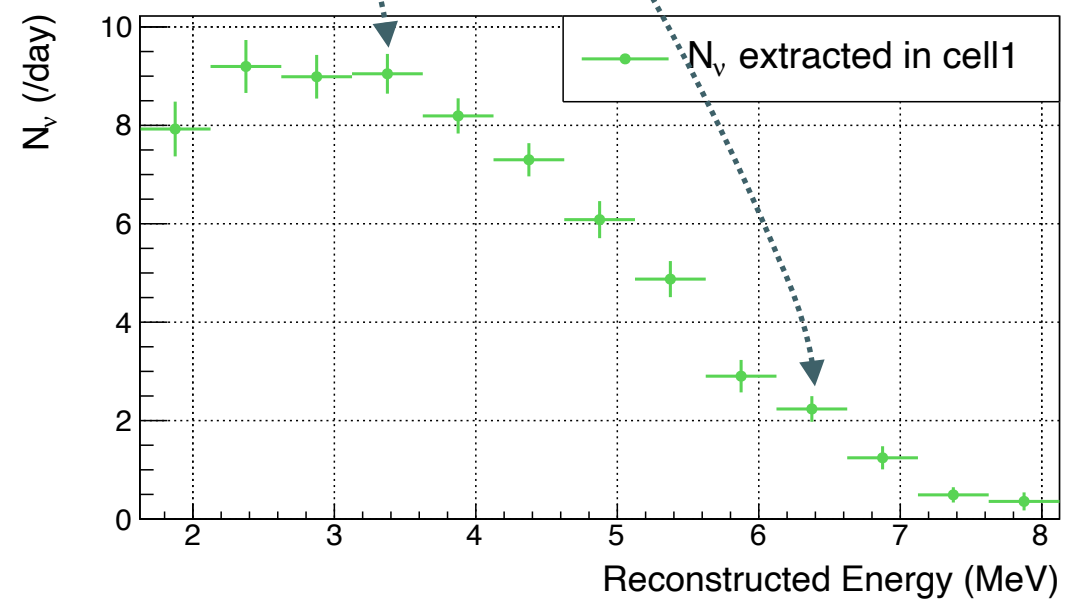
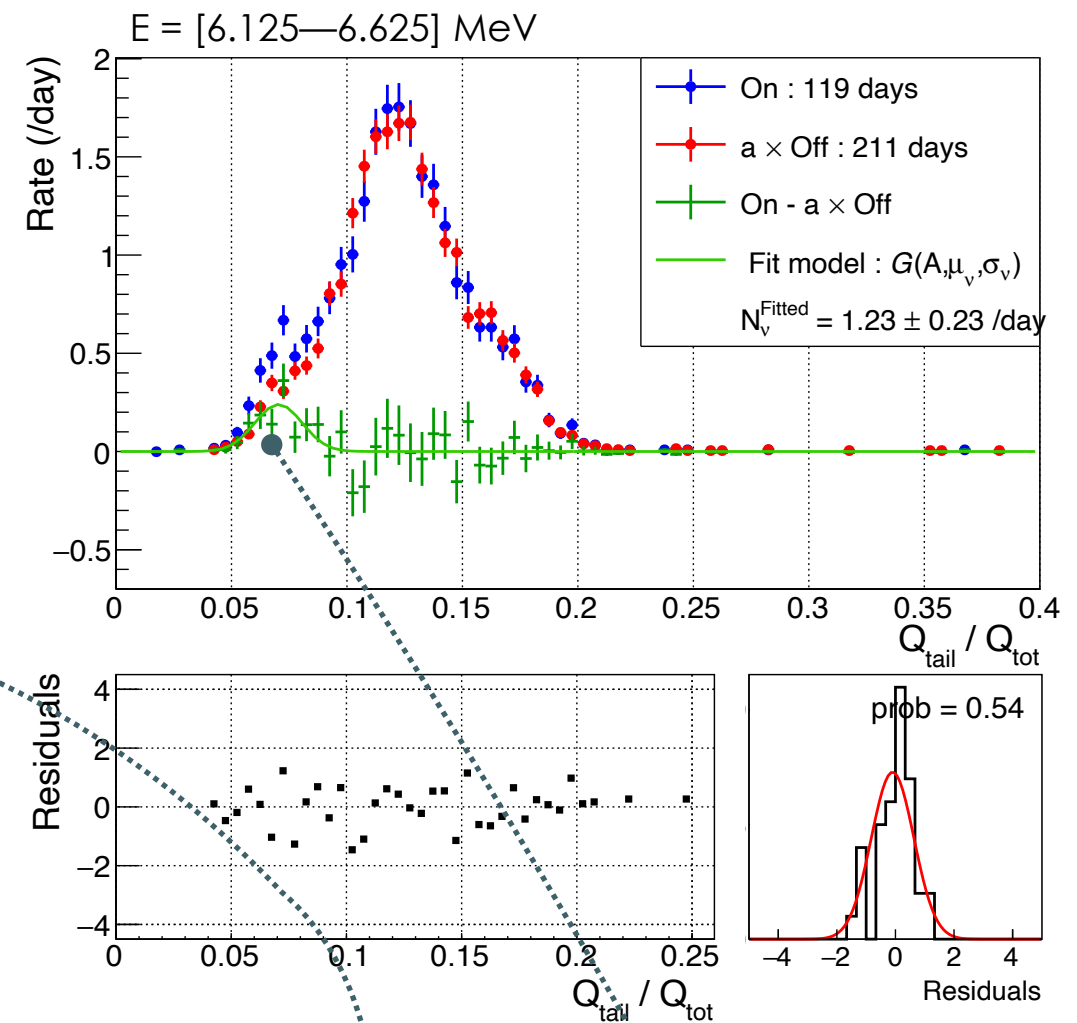
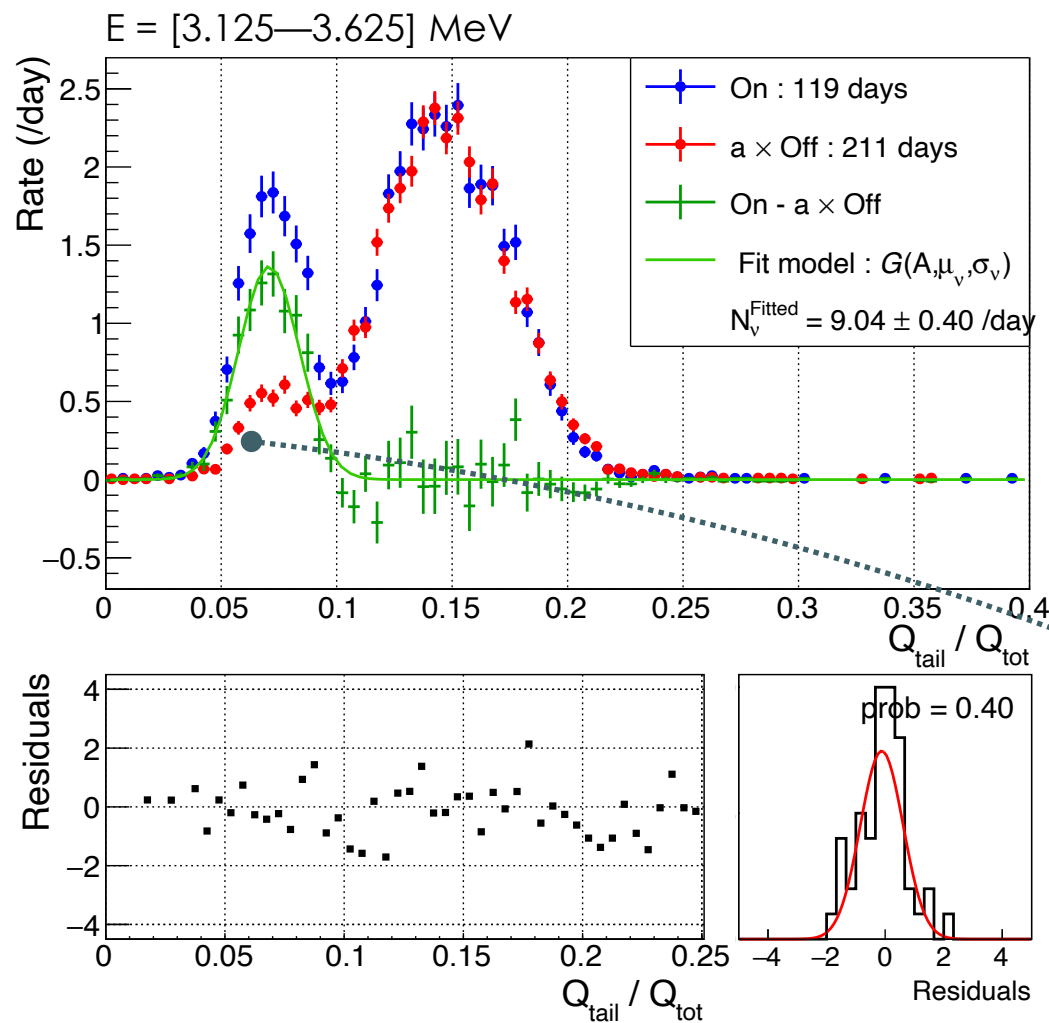
Hypothèses :

- Modélisation des neutrinos par $\mathcal{G}(\mathcal{A}, \mu, \sigma)$
- Faible biais de la méthode

✓ Biais < Erreur statistique (~5%)



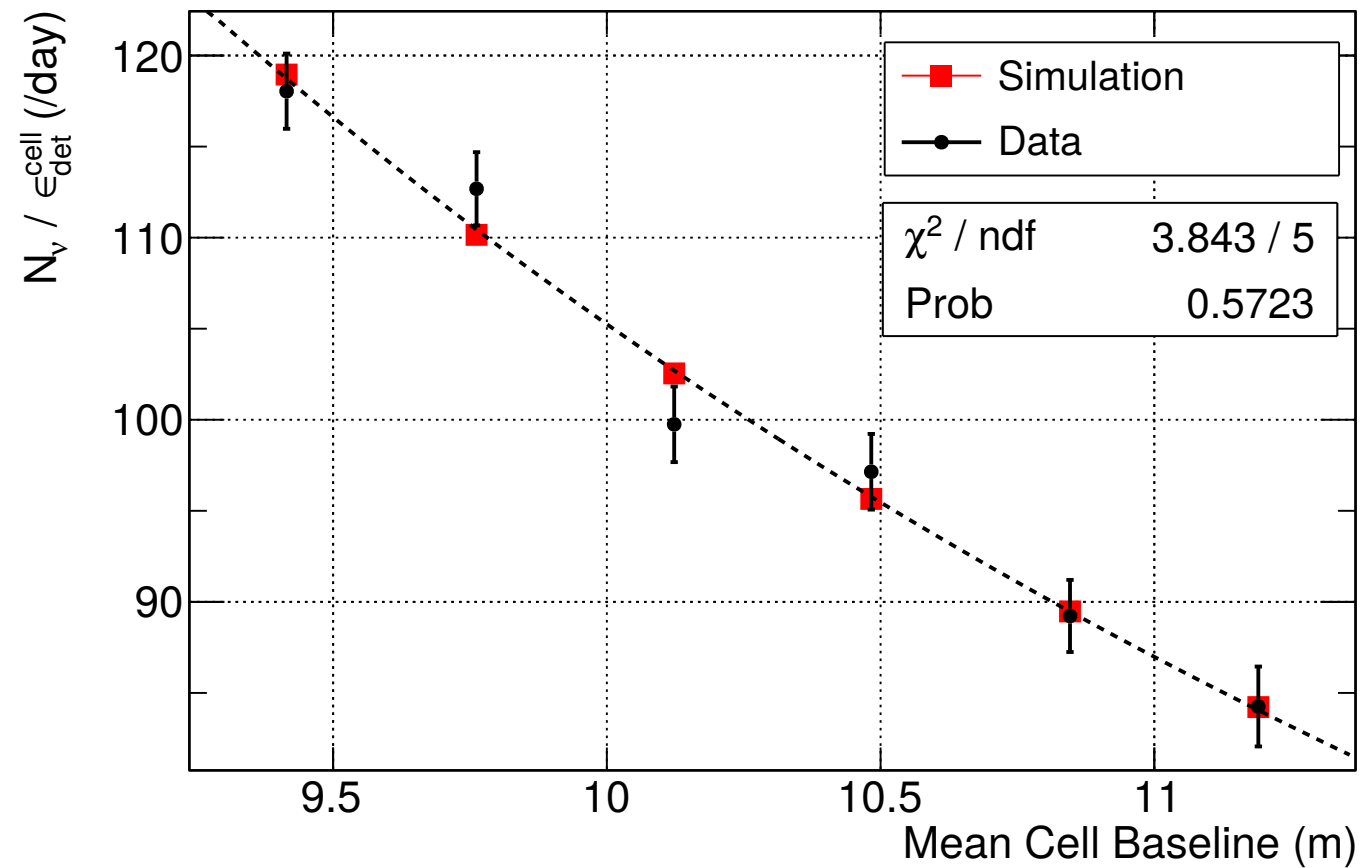
EXTRACTION DU SIGNAL NEUTRINO (DONNÉES)



- ✓ Etude des **résidus**, pour chaque cellule et chaque intervalle d'énergie
- ✓ Contrôle de l'**accord données/modèle** de chaque ajustement (loi de χ^2)

TAUX PAR CELLULE

- Les taux intégrés par cellule suivent une loi en $1/L^2$ (distance au coeur)



1. Normalisation absolue

- Confirmation du déficit ?

2. Analyse de la forme du spectre

- Comparaison à la prédiction
- Présence du *bump* à 5 MeV ?

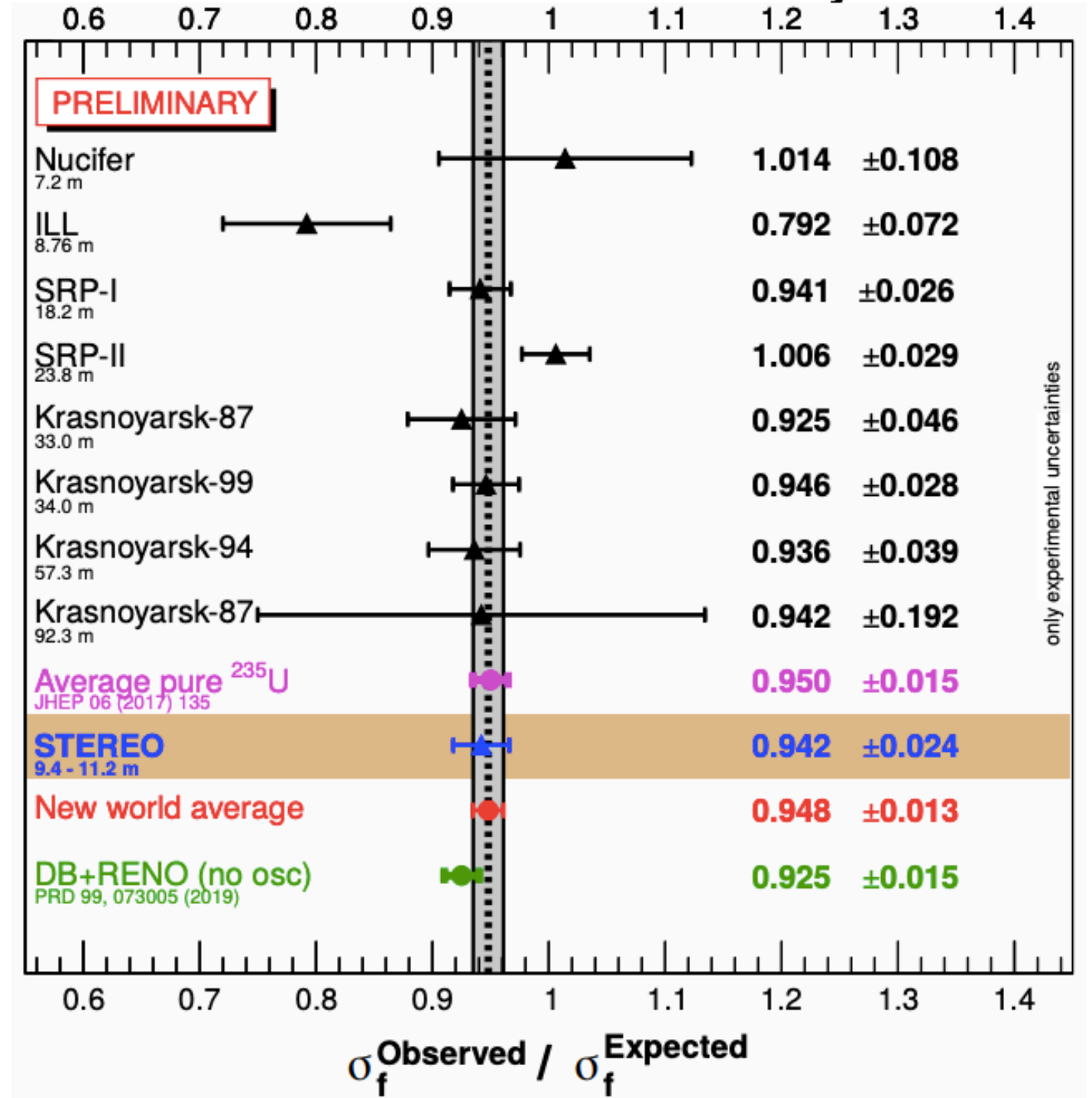
3. Analyse d'oscillation :

- Nécessité d'être **indépendant de la prédiction**

NORMALISATION ABSOLUE

CNNP 2020

Rate Measurement - Phase I + II Analysis

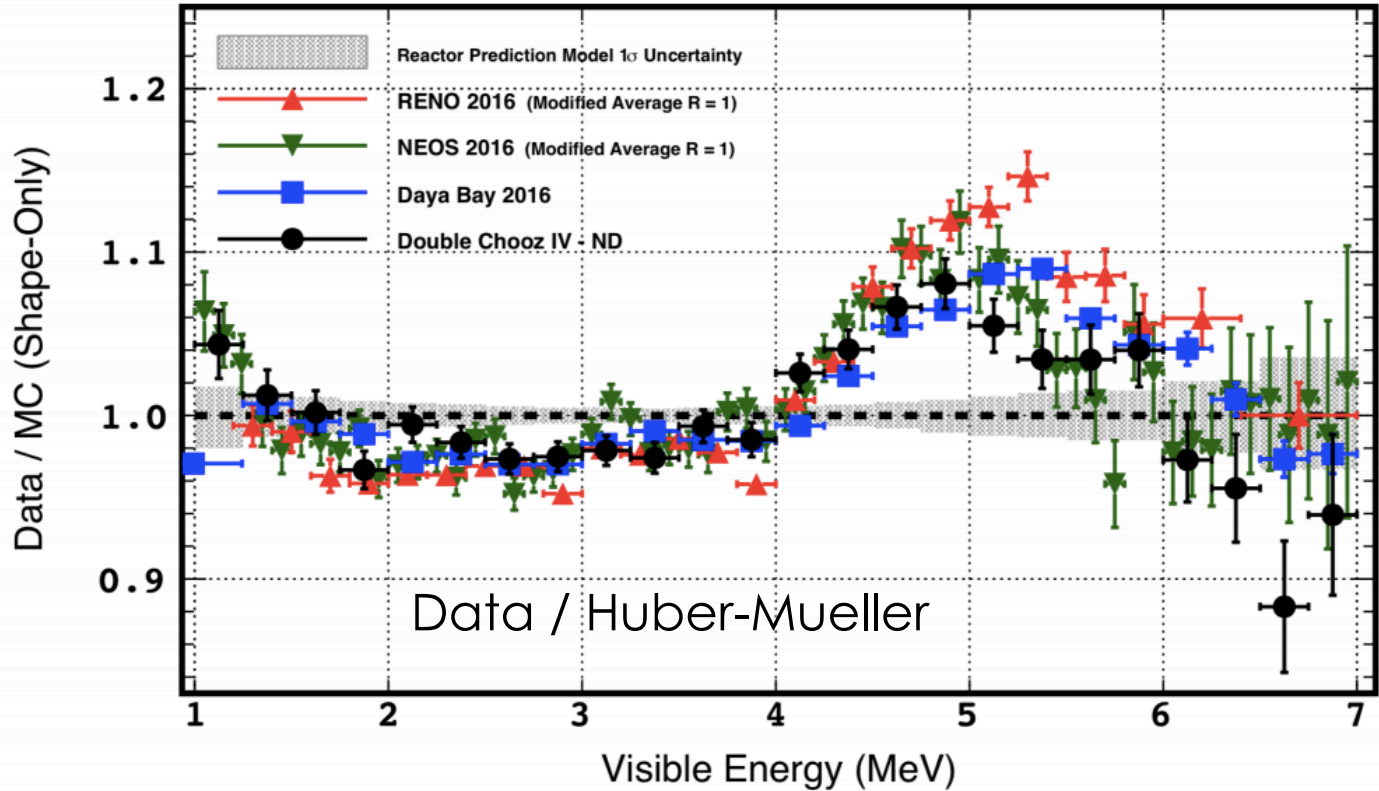


- Taux extraits : (363.8 ± 1.4) /jour comparés aux taux prédits
- Mesure la plus précise du flux de neutrino pour l' ^{235}U pur
- En accord avec la moyenne mondiale

FORME DU SPECTRE

arXiv : 1901.09445, Collaboration Double-Chooz

Plusieurs expériences ont vu un *bump*
Double Chooz, Reno, Daya Bay

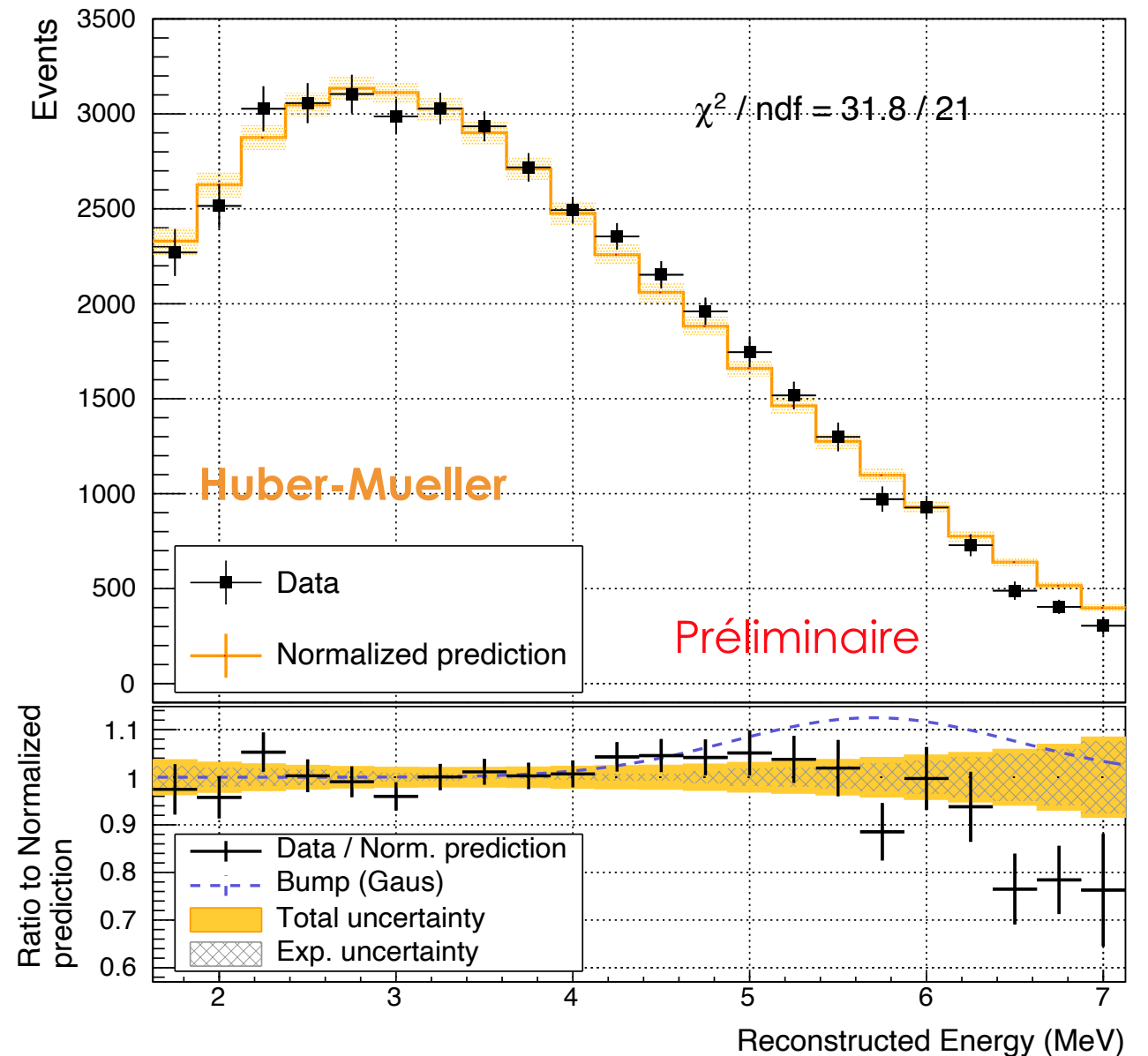


FORME DU SPECTRE

- **Bon accord jusqu'à 6.375 MeV** ($\chi^2/\text{ndf} = 14.9/18$)
- **Déviations importantes au-delà** ($\chi^2/\text{ndf} = 31.8/21$)
 - Prédiction ?
- **Perspectives** pour tirer des conclusions sur la forme du spectre :
 - ✓ Meilleure contrainte de l'échelle en énergie :
 - spectre continu du Bore12
 - ✓ Augmentation de la statistique
 - Comparaison avec d'autres expériences en ^{235}U pur (PROSPECT, Solid)

Moriond 2019

arXiv:1905.11896



$D_{l,i}$ Taux de neutrinos mesurés

$M_{l,i}(\vec{\mu})$ Taux prédits pour une hypothèse d'oscillation (H_μ)

Paramètre de nuisance	Source	Incertitude relative (%)
α_l^{NormU}	Normalisation (non-corrélée)	
	Volume des cellules	0.83
	Correction de l'efficacité neutron	0.84
$\alpha_l^{\text{EscaleU}}$	Échelle en énergie (non-corrélée)	
	Ancrage du point Mn	0.2
	Déviaton entre cellules	0.5
$\alpha_l^{\text{EscaleC}}$	Échelle en énergie (corrélée)	
	Stabilité en temps	0.3
	Ancrage de la calibration	1

- Incertitudes systématiques : paramètres de nuisance α

$$M_{l,i}(\vec{\mu}, \vec{\alpha}) = M_{l,i}(\vec{\mu}) \left(1 + \alpha_l^{\text{NormU}} + S_{l,i}^{\text{Escale}}(\mu) \cdot (\alpha^{\text{EscaleC}} + \alpha_l^{\text{EscaleU}}) \right)$$

- Indépendant de la forme de la prédiction : Φ_i paramètre libre pour chaque E, commun aux 6 cellules

$$\chi^2 = \sum_l^{N_{\text{Cells}}} \sum_i^{N_{\text{Ebins}}} \left(\frac{D_{l,i} - \Phi_i M_{l,i}(\vec{\mu}, \vec{\alpha})}{\sigma_{l,i}} \right)^2 + \sum_l^{N_{\text{Cells}}} \left(\frac{\alpha_l^{\text{NormU}}}{\sigma_l^{\text{NormU}}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha^{\text{EscaleC}}}{\sigma^{\text{EscaleC}}} \right)^2 + \sum_l^{N_{\text{Cells}}} \left(\frac{\alpha_l^{\text{EscaleU}}}{\sigma_l^{\text{EscaleU}}} \right)^2$$

Test de l'hypothèse de non-oscillation

- Données compatibles avec le modèle sans oscillation

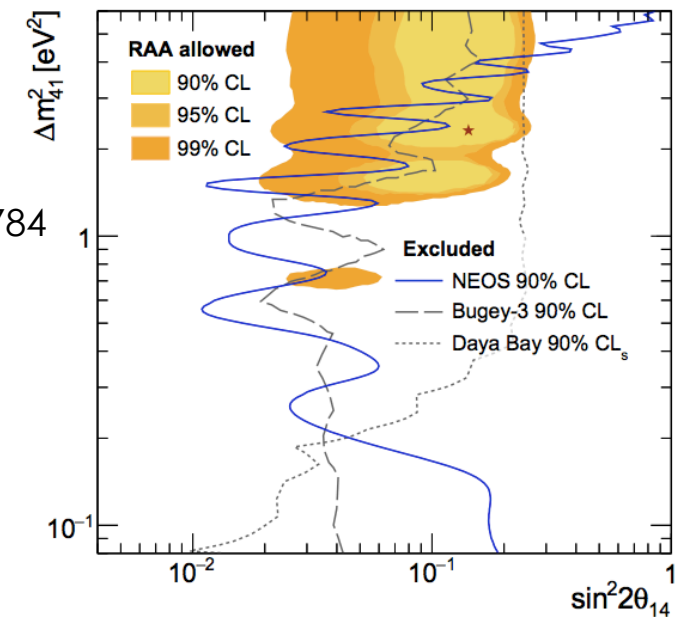
OSCILLATION : EXCLUSION DU STÉRILE

Contours d'exclusion de toutes les hypothèses du plan des paramètres

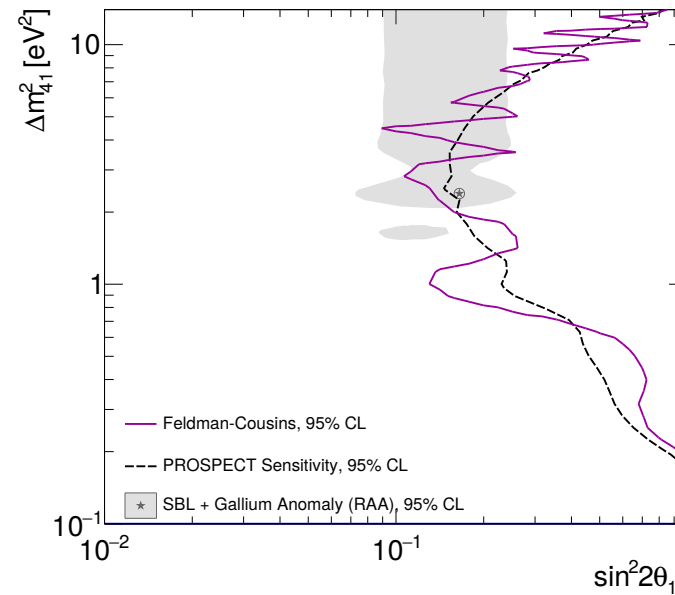
$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(E_{\bar{\nu}_e}, L) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E_{\bar{\nu}_e} [MeV]} \right)$$

- Oscillation de la RAA (presque) entièrement rejetée
 - Meilleur ajustement rejeté à 99.9 % C.L.
 - Perspective : doubler la statistique

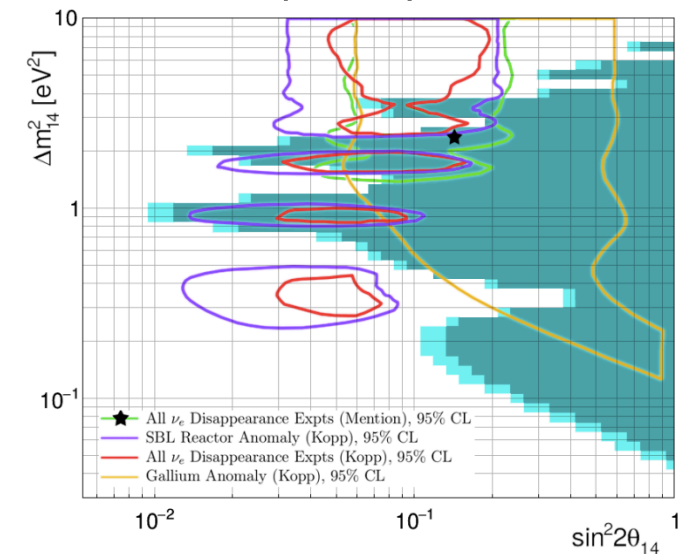
NEOS (2016) arXiv:1610.05134



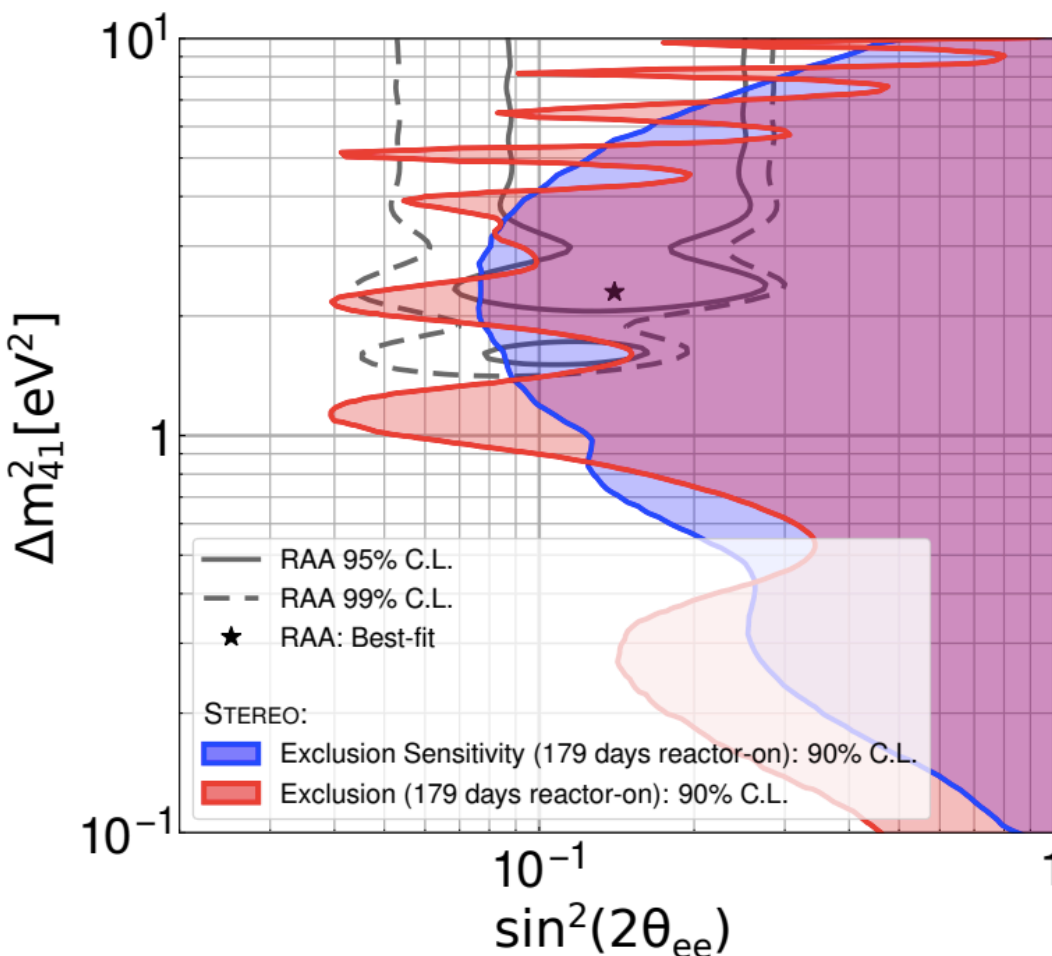
PROSPECT (2018) arxiv: 1806.02784



DANSS (2018) arxiv:1811.07354



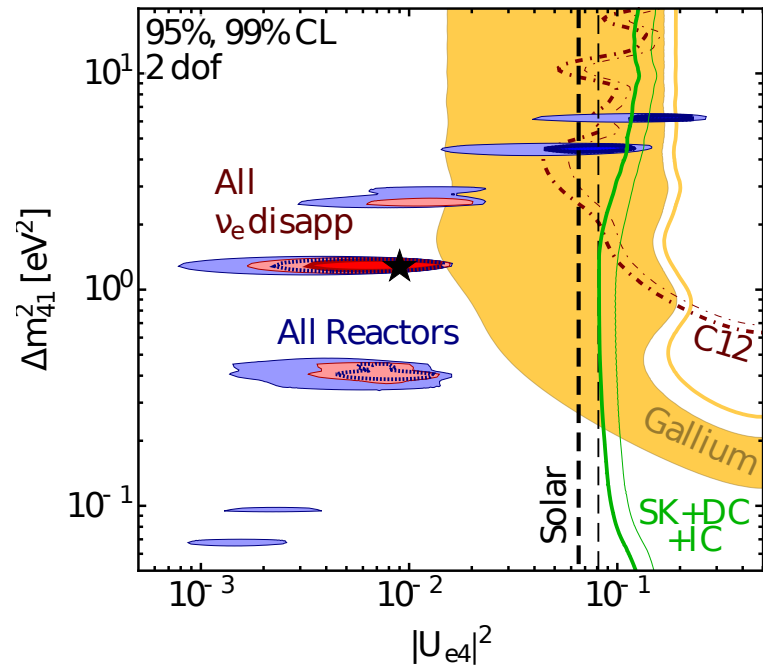
- Tendance globale de la communauté : pas de stérile dans la région RAA



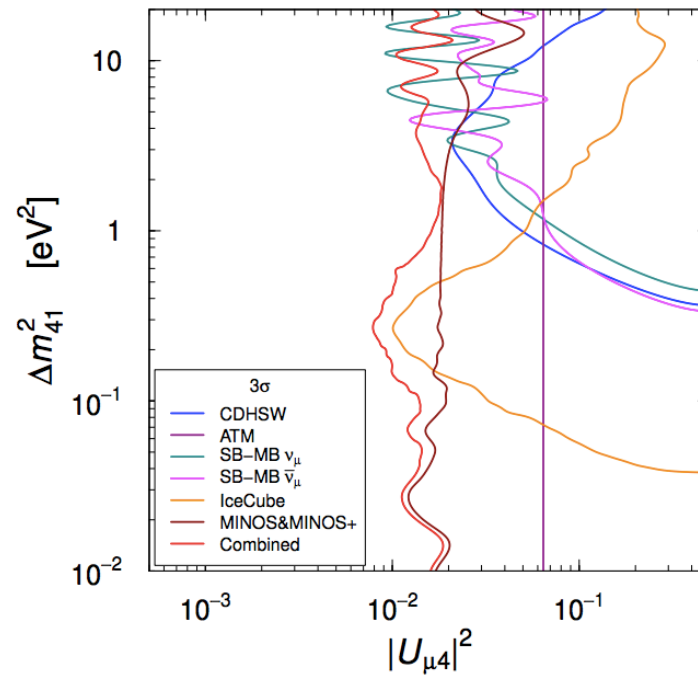
OSCILLATION : CONTRAINTES DES AUTRES SECTEURS

arXiv : 1901.08330

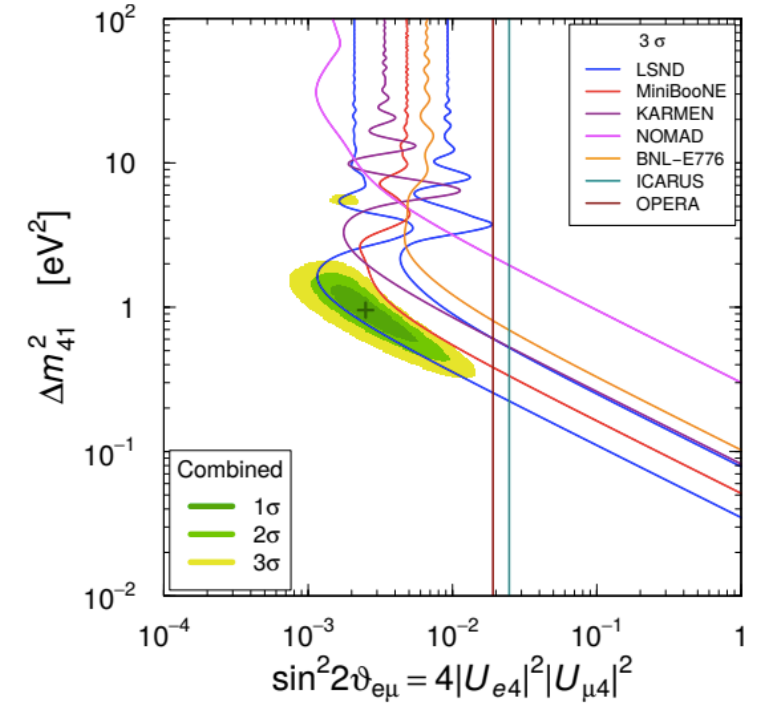
Disparition (électronique)



Disparition (muonique)



Apparition



(b)

(disparition $\bar{\nu}_e$)

(disparition $\bar{\nu}_\mu$)

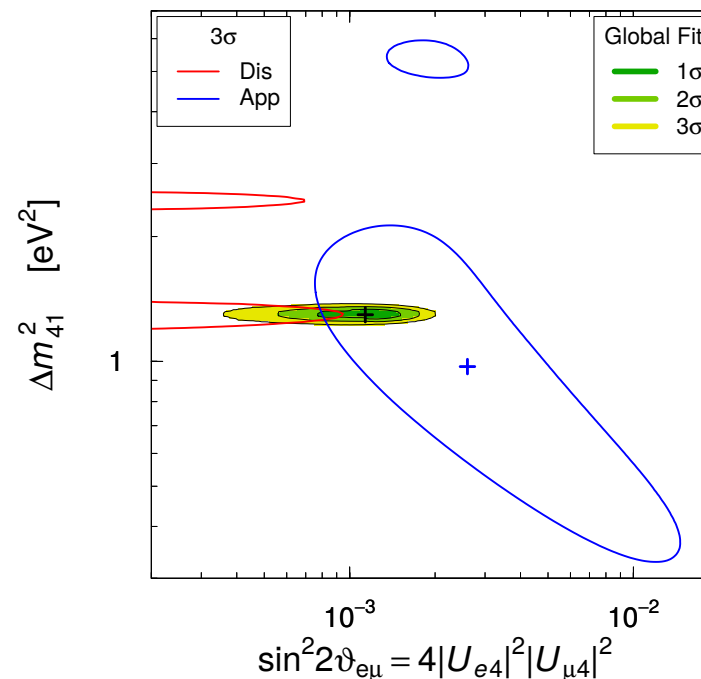
($\bar{\nu}_\mu \rightleftharpoons \bar{\nu}_e$)

$$\sin^2(2\theta_{ee}) = 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2) = \sin^2 2\theta_{14}$$

$$\sin^2(2\theta_{\mu\mu}) = 4|U_{\mu4}|^2(1 - |U_{\mu4}|^2) \simeq \sin^2 2\theta_{24}$$

$$\sin^2(2\theta_{e\mu}) = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2 = \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \theta_{24}$$

Disparition et apparition



L'ensemble des résultats d'apparition et de disparition sont en fortes tensions dans un modèle avec un neutrino stérile

... STEREO

Déficit pour ^{235}U confirmé

Exclusion du stérile (double la statistique d'ici à fin 2020)

Forme du spectre :

- Bump à 5 MeV ?
- Analyse combinée avec PROSPECT (Solid)
- **Proposer une référence pour l'U5** (expériences futures, prédiction)

... Expériences réacteurs

Neutrino stérile comme explication de la RAA presque entièrement rejeté **dans la région de la RAA originelle**

- **Biais dans la prédiction du flux** émis par les réacteurs
- Travaux récents de ré-évaluation des flux contradictoires
- Piste expérimentale : étude des contributions propres à chaque isotopes (STEREO/SOLID/PROSPECT)
- **Continuer les recherches de stérile dans les expériences futures**

Merci pour votre attention



Lison (Morioud 2019)

Présentation

RAA

STEREO

Sélection signal neutrino et bruit de fond

Extraction des neutrinos

Analyses statistiques

Back-up slides

Reacteurs

STEREO

Signal et bruits de fond

Pulse Shape Discrimination

Extraction des neutrinos

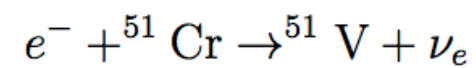
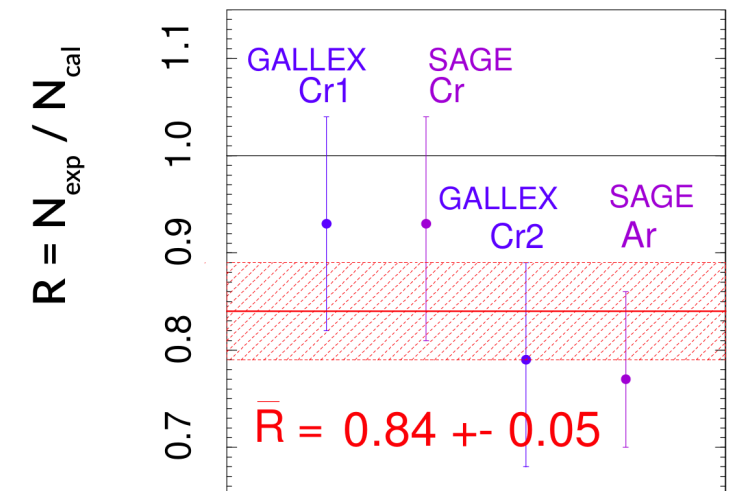
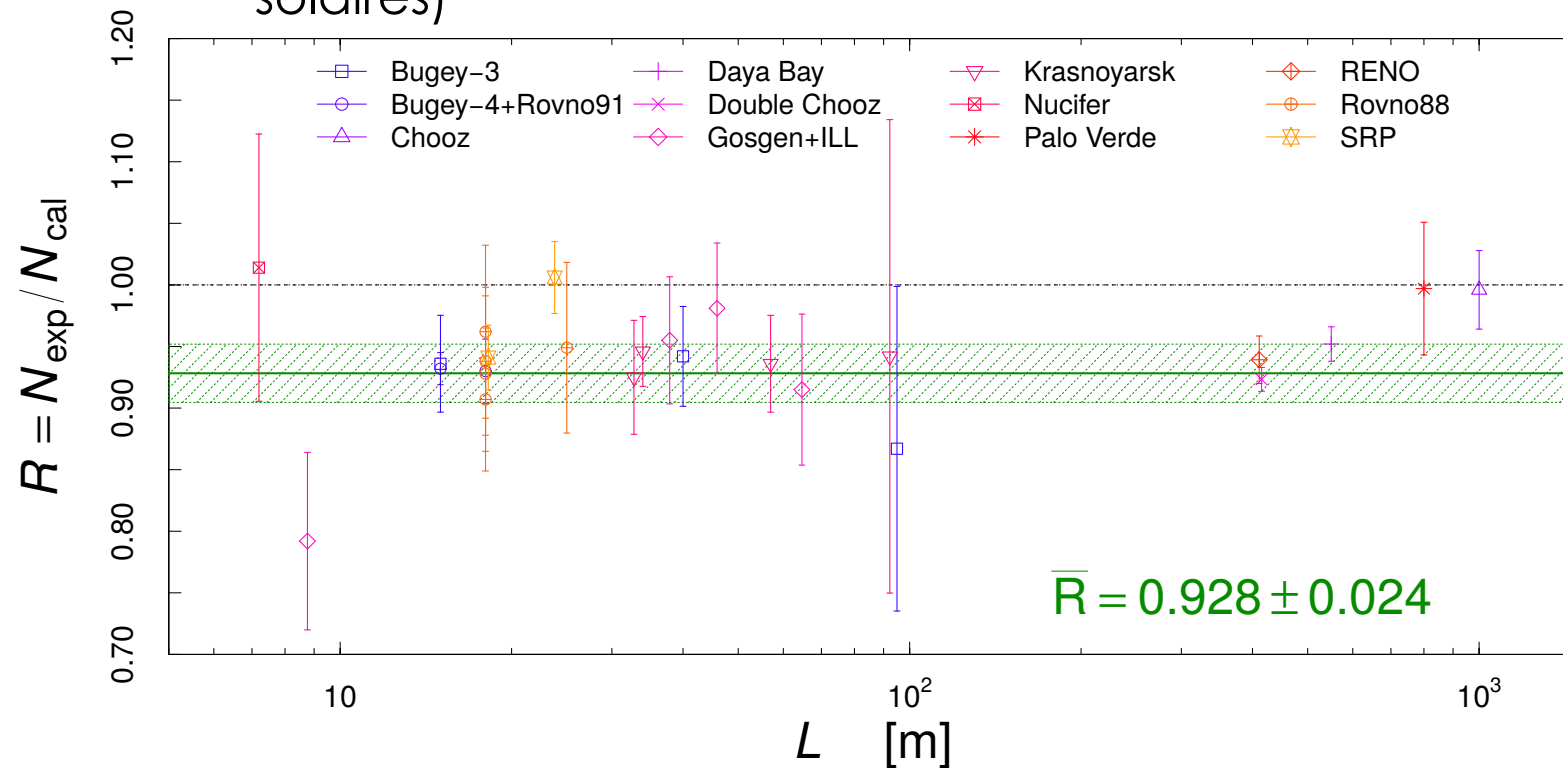
Analyses globales

Analyses statistiques

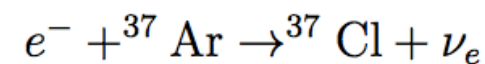
Réacteurs

Disparition de neutrinos à $L < 100$ m :

- RAA (neutrinos de réacteur)
- GALLEX/SAGE (sources de calibration pour expériences de détection de neutrinos solaires)

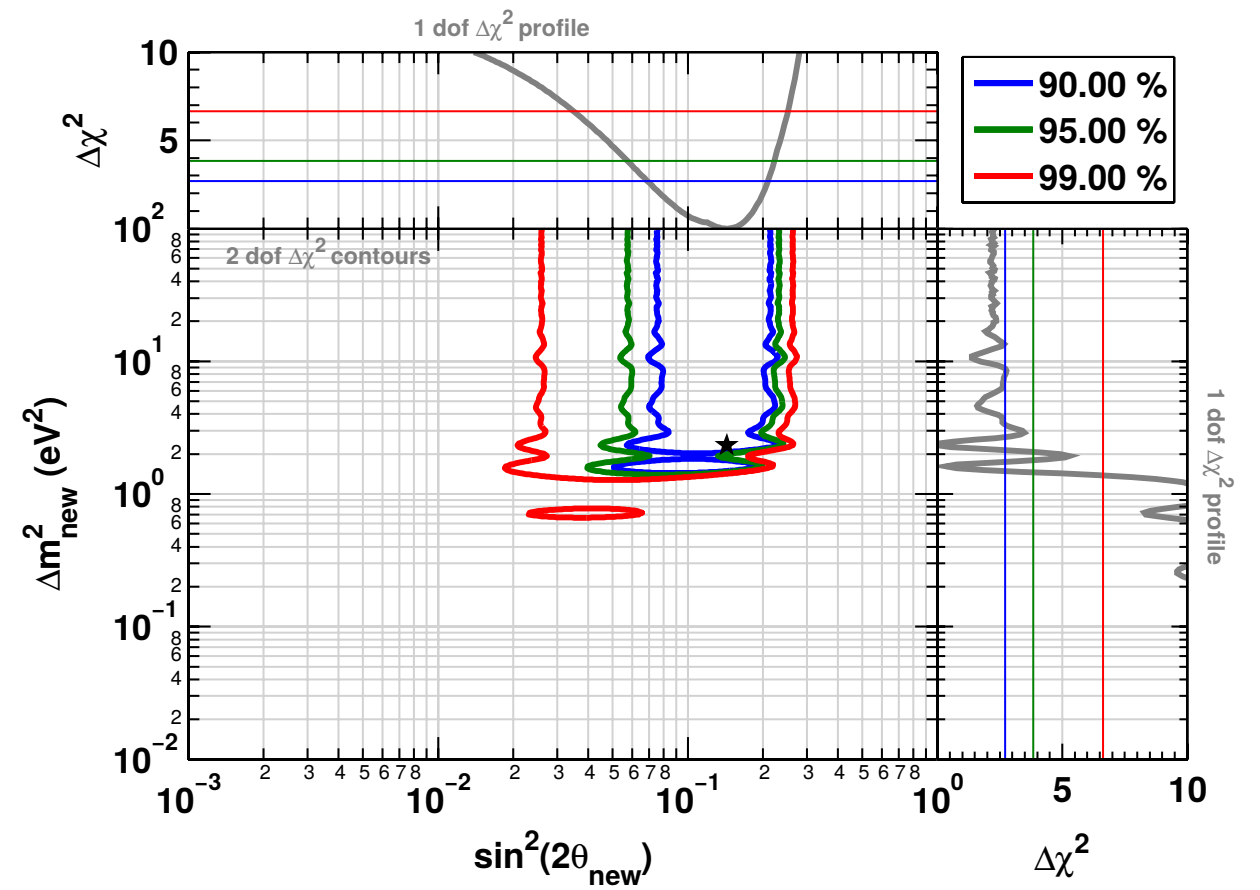
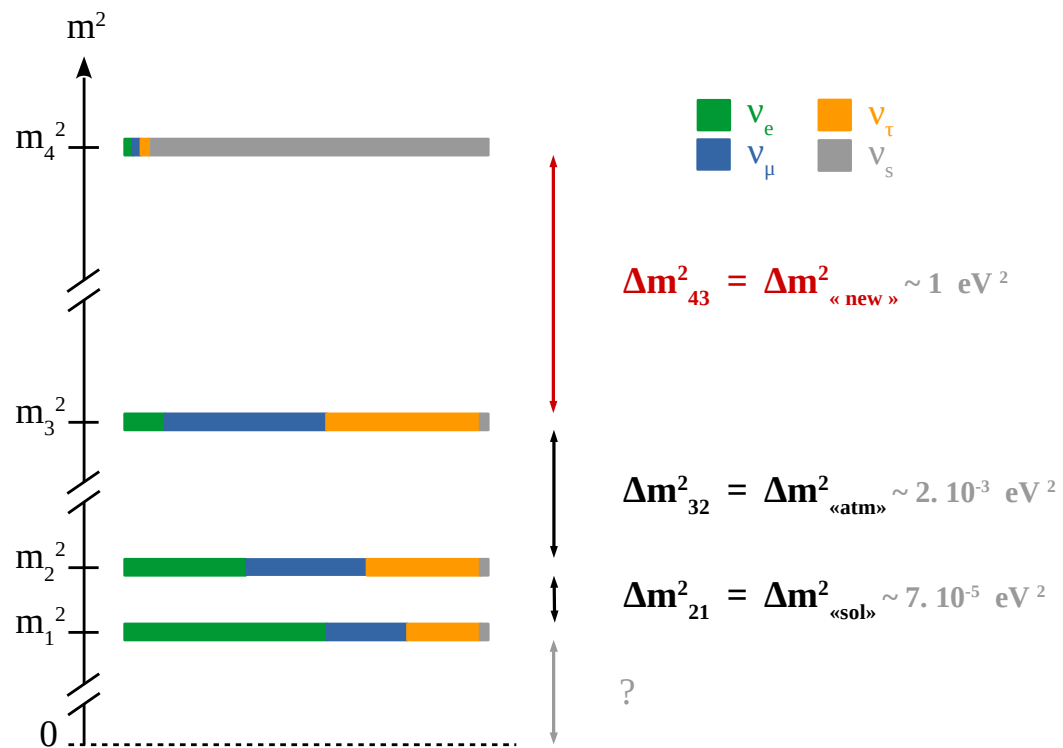


~ 750 keV et ~ 430 keV



~ 812 keV

Meilleur ajustement RAA+Gallium+LSND



1 — Méthode de conversion

Utilisation du spectre beta provenant de la fission d'un isotope (U5, Pu241, Pu239), mesuré dans les années 80 à l'ILL (*Schreckenbach et al.*). Utilisation de branches virtuelles (10)

2 — Méthode conversion (5%) + sommation (95%) **Modèle de Huber-Mueller (2011-12)**

Utilisation de toutes les données nucléaires connues sur les produits de fission

Insuffisant pour reproduire les mesures des spectres beta : Introduction de branches virtuelles pour combler les 5% manquant et reproduire la mesure de l'ILL, transitions autorisées seulement

2019 : update (HKSS) (arxiv:1908.08302) inclusion des transitions interdites

- Déficit augmenté (niveau de confiance de 2.3 à 2.9 sigma), *bump* diminué

3 — Méthode de sommation (100%)

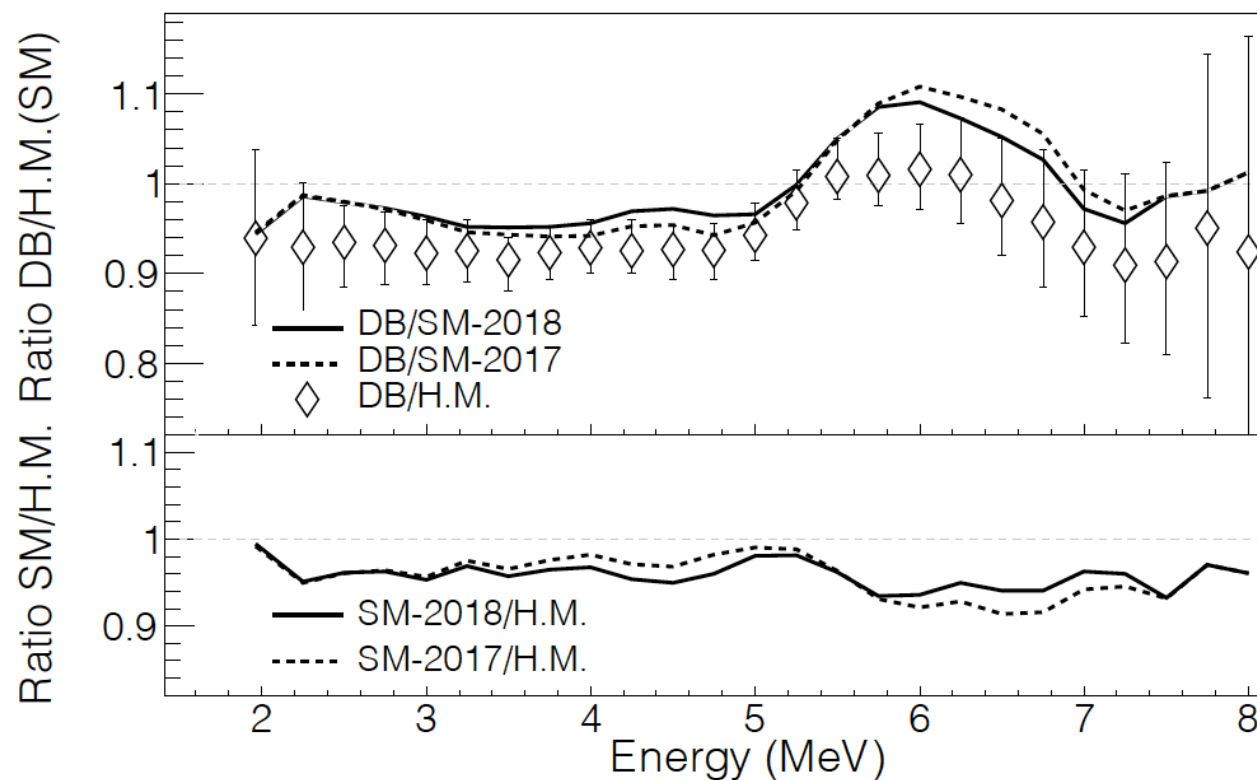
Utilisation de toutes les données nucléaires connues sur les produits de fission

2019 : (Phys. Rev. Lett. 123)

- **Mise à jour des bases de données** (JEFF-3.3, ENDF/B-VIII.0, gross theory (Qbeta approximation for missing information))
- **Inclusion de données TAGS*** (Tc, Mo, Nb, Rb, Br)
 - Total Absorption Gamma-Spectroscopy
 - Effet Pandemonium : mauvaise efficacité des détecteurs Ge (transitions vers les états très excités émetteurs de gamma de faible énergie non détectées) -> surestimation du spectre neutrino à haute énergie
- Déficit avec Dana Bay ~1.9% (réduction de 2.3 à 0.95 sigma), *bump* à 5 MeV toujours présent

Prédiction : méthode de sommation

Utilisation de toutes les données nucléaires connues sur les produits de fission



Update 2019 :

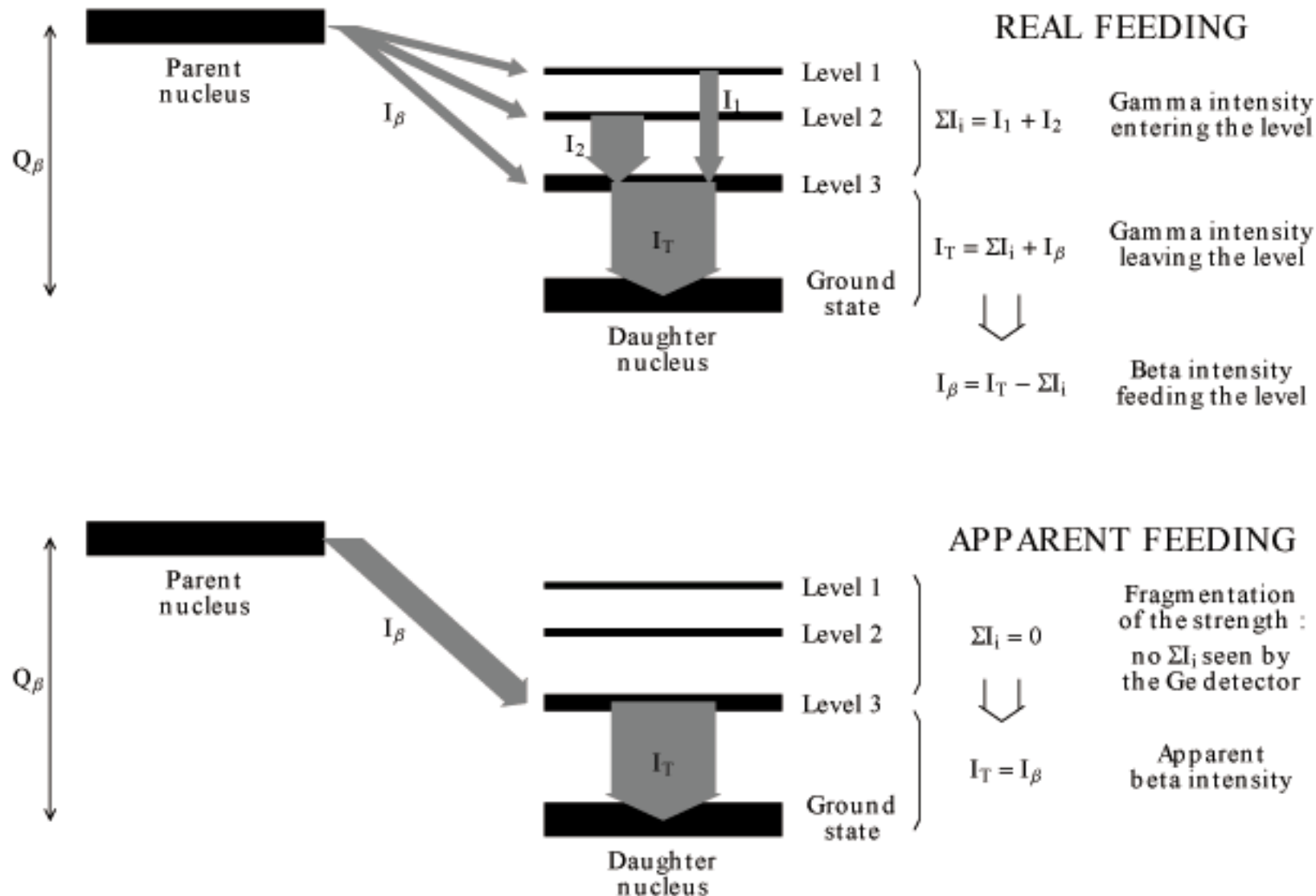
- **Mise à jour des bases de données** (JEFF-3.3, ENDF/B-VIII.0, gross theory (Qbeta approximation for missing information))
- **Inclusion de données TAGS*** (Tc, Mo, Nb, Rb, Br)
 - Total Absorption Gamma-Spectroscopy
 - Effet Pandemonium : mauvaise efficacité des détecteurs Ge (transitions vers les états très excités émetteurs de gamma de haute énergie non détectées) -> surestimation du spectre neutrino à haute énergie
- Déficit avec Daya Bay $\sim 1.9\%$, *bump* à 5 MeV toujours présent (niveau de confiance réduit de 2.3 à 0.95σ)

Effet Pandemonium :

Affecte les noyaux à haut Q_{β} (grande fragmentation)

Dû à une mauvaise efficacité des détecteurs Ge (1-5%)

→ **Surestimation de l'énergie des électrons (et donc neutrinos) émis**



Problème dans la mesure des rayons gammas des niveaux très excités :

Faible probabilité d'émission

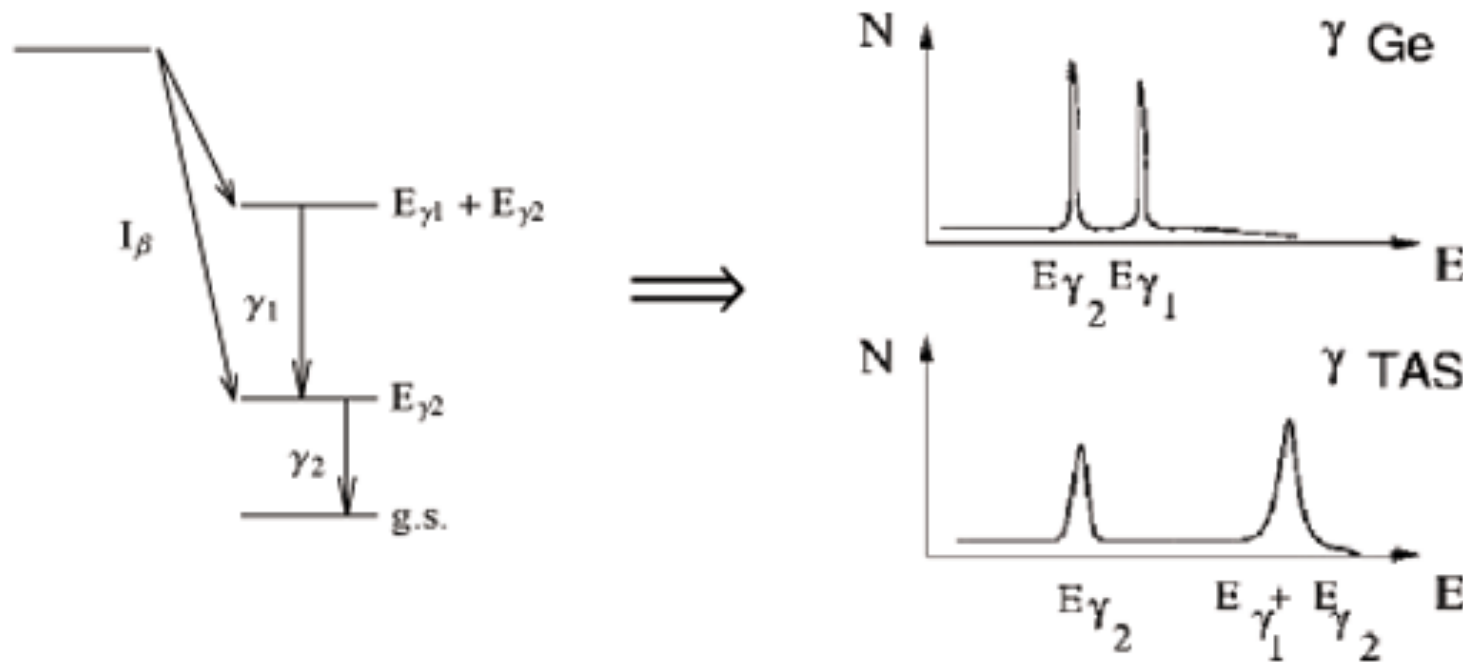
Peuvent avoir une très haute énergie

Effet Pandemonium :

Affecte les noyaux à haut Q_{β} (grande fragmentation)

Dû à une mauvaise efficacité des détecteurs Ge (1-5%)

HR gamma spectrum vs. TAS gamma spectrum

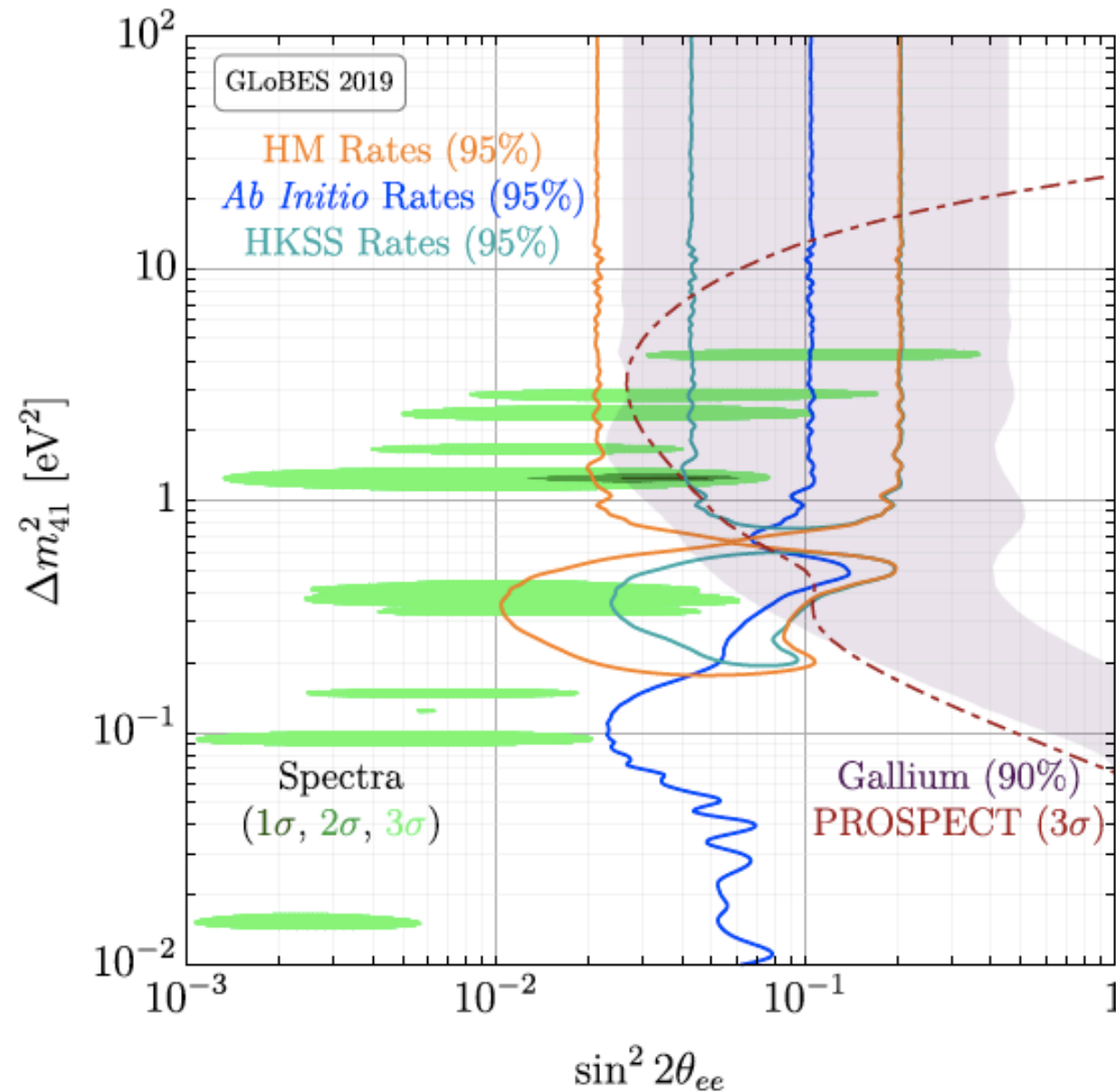


Solution : TAGS

Total absorption gamma spectroscopy

Scintillateur crystal + PMT

100% efficacité



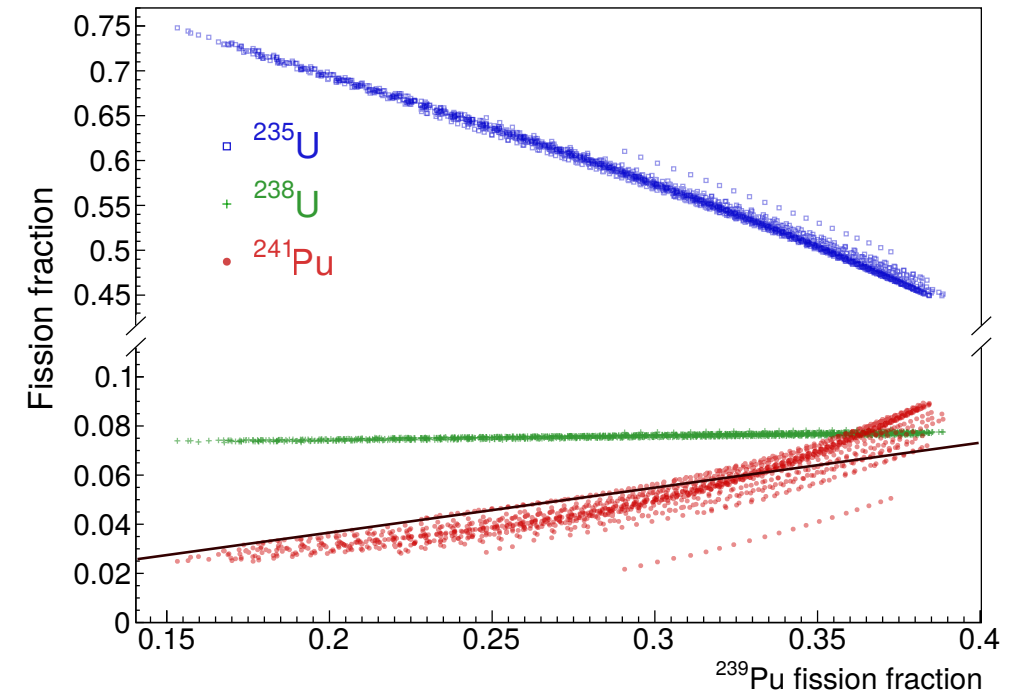
- Les 2 updates de la prédiction sont contradictoires vis-à-vis de l'hypothèse du neutrino stérile
 - SM 2019 (Ab initio) : déficit passe de 6% à 1.9% (0.95sigma)
 - HKSS 2019 (forbidden trans.) : déficit augmente (2.9sigma)
- Les nouveaux paramètres préférés se trouvent juste au-delà de la zone de sensibilité des expériences présents (STEREO, PROSPECT, ...)
- **Nécessité de poursuivre les tests de neutrino stérile dans les expériences futures (JUNO, DUNE, HK ...)**

BACK-UP

arXiv : [1704.01082 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1704.01082)

- Daya Bay : évolution des contributions des isotopes principaux
- 2017 : 2.2 millions candidats IBD, 6 coeurs de 2.9 GWth

fractions de fission **connues**



$$\sigma_f^a = \sum_{i=^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}, ^{238}\text{U}, ^{241}\text{Pu}} F_i^a \sigma_i$$

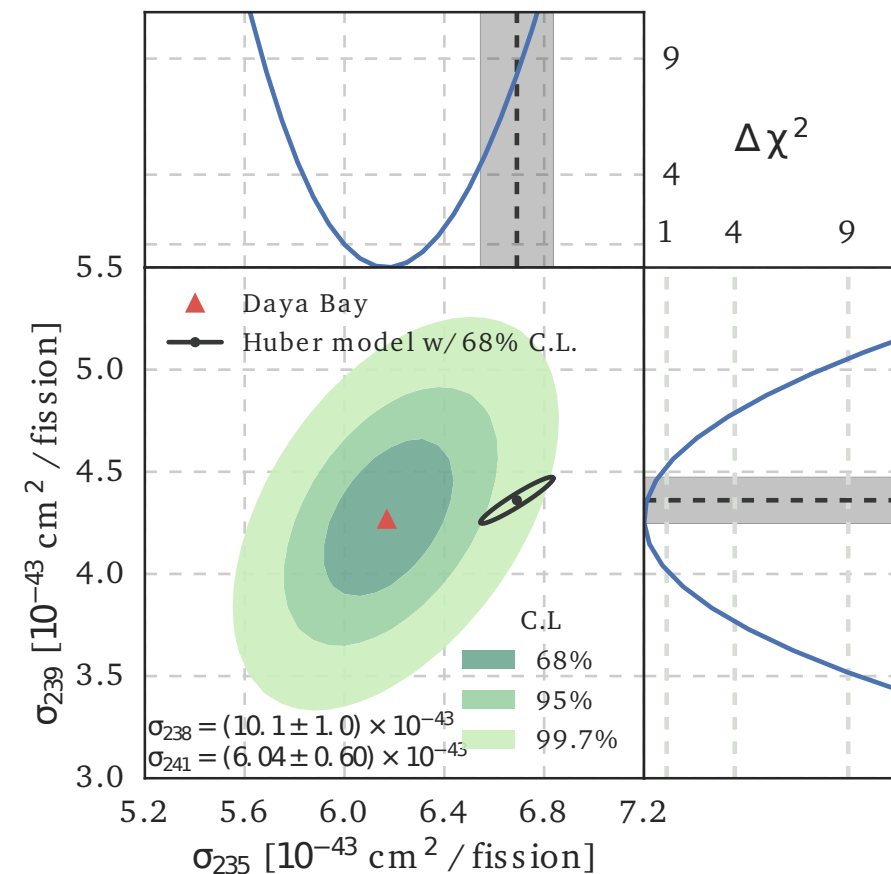
Taux de neutrino **mesuré**
en « rendement IBD par fission » par fraction a de ^{239}Pu
($\text{cm}^2 \cdot \text{fission}^{-1} \cdot F_{239}^{-1}$)

rendements IBD par fission pour un isotope **ajustés**

$$R_{\sigma_{235}} = (0.920 \pm 0.023(\text{exp}) \pm 0.021(\text{modèle}))\%$$

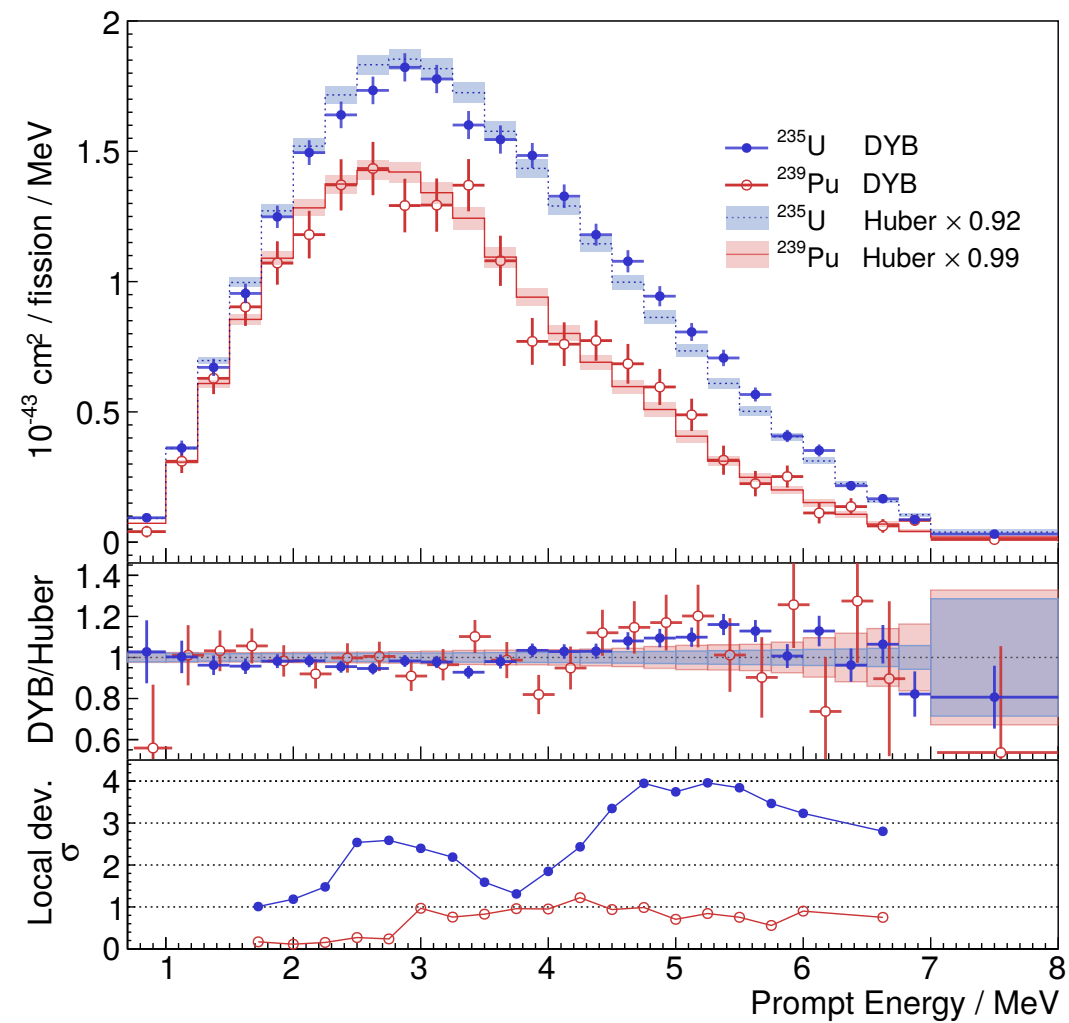
$$R_{\sigma_{239}} = (0.990 \pm 0.057(\text{exp}) \pm 0.025(\text{modèle}))\%$$

→ Confirmé par RENO



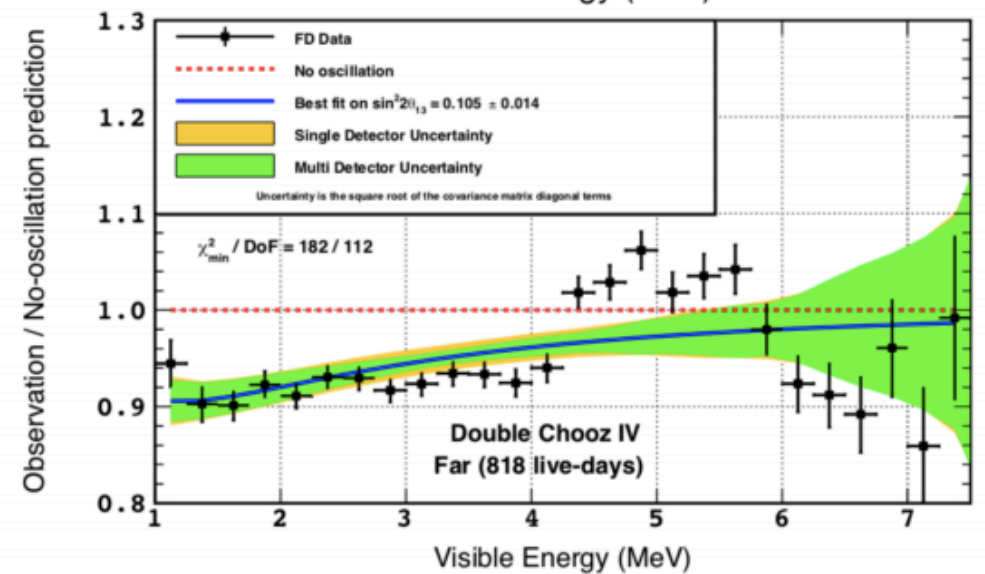
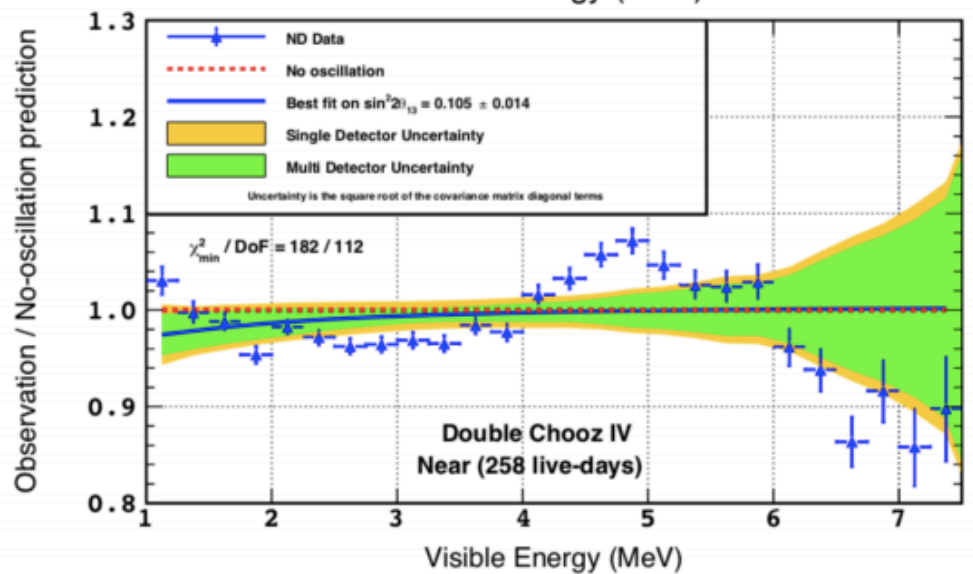
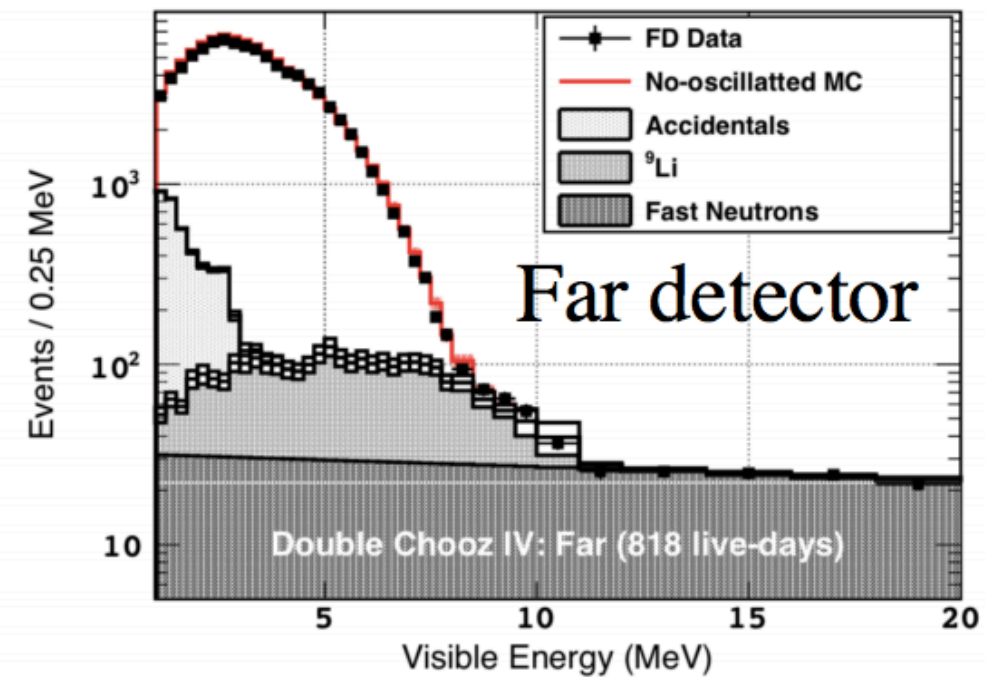
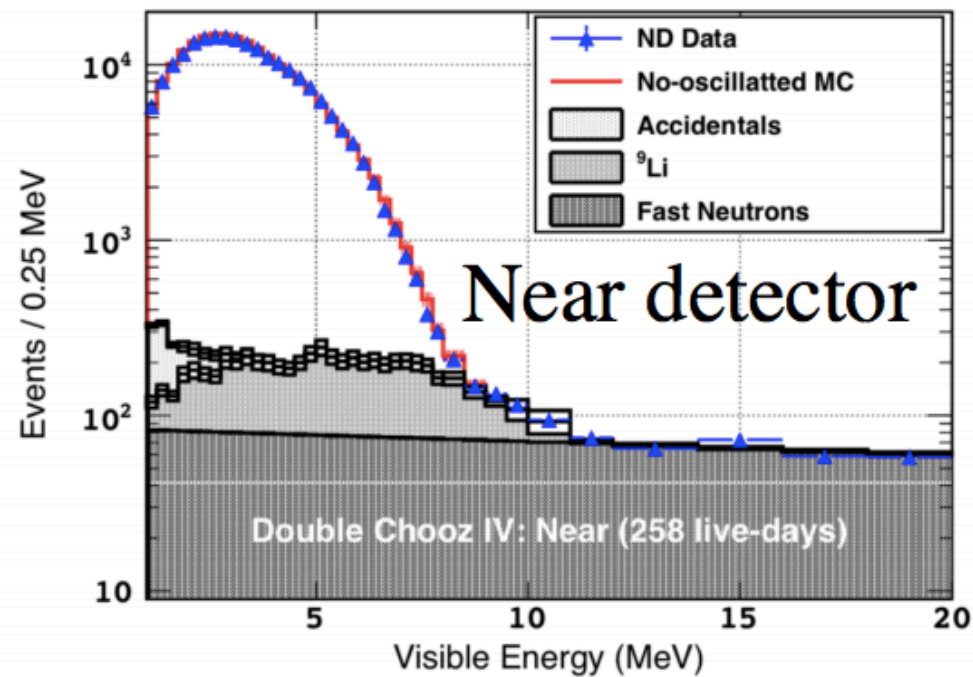
- Daya Bay : spectres associés à l'U5 et au Pu9

arXiv : [1904.07812](https://arxiv.org/abs/1904.07812) [hep-ex]

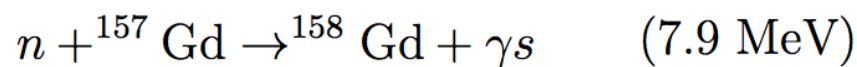
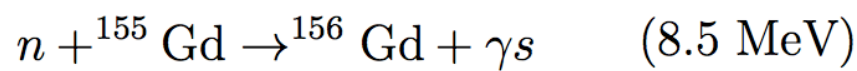
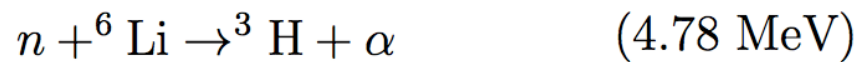
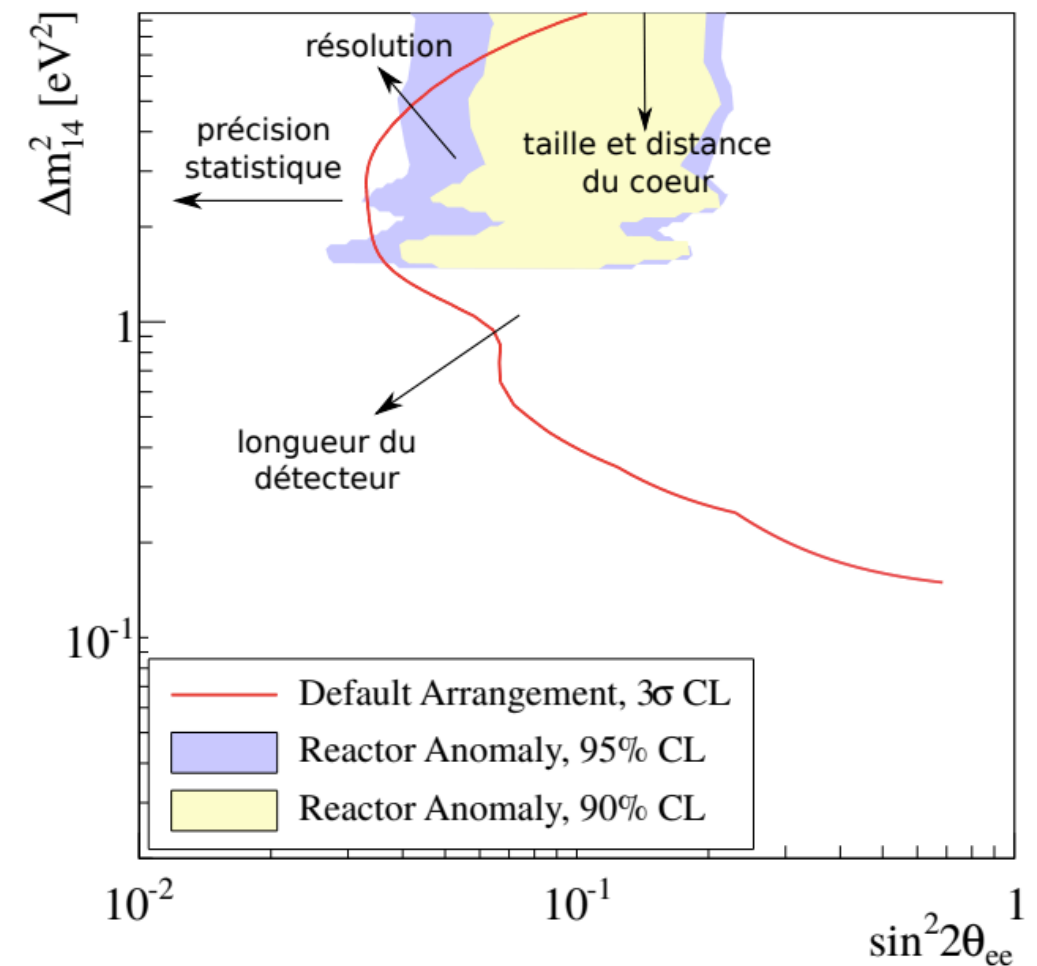


Double Chooz (présenté à TAUP 2019)

arXiv:1901.09445



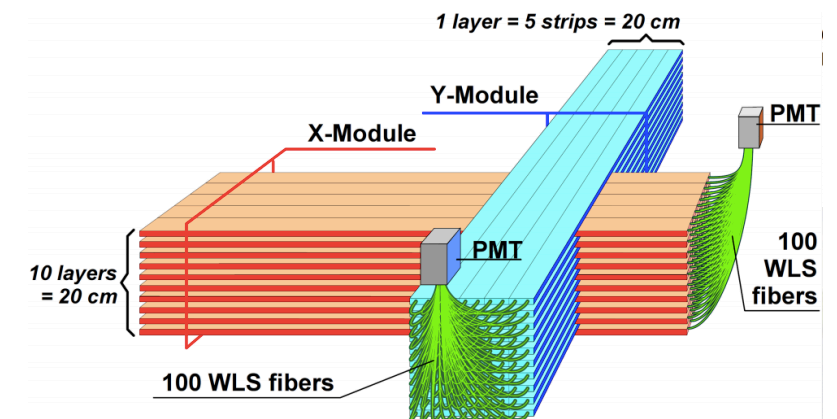
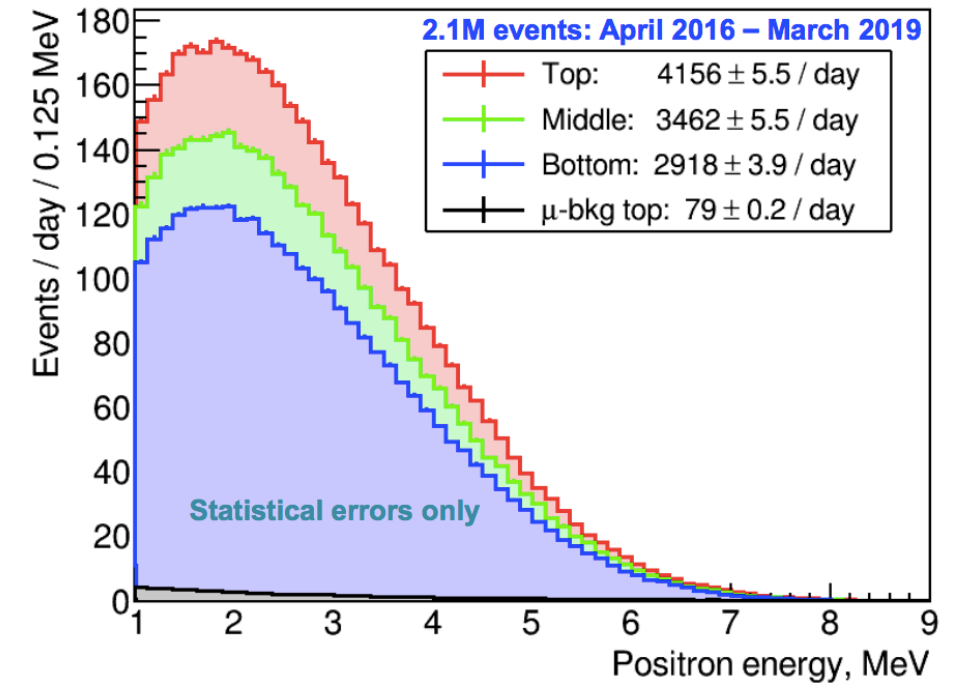
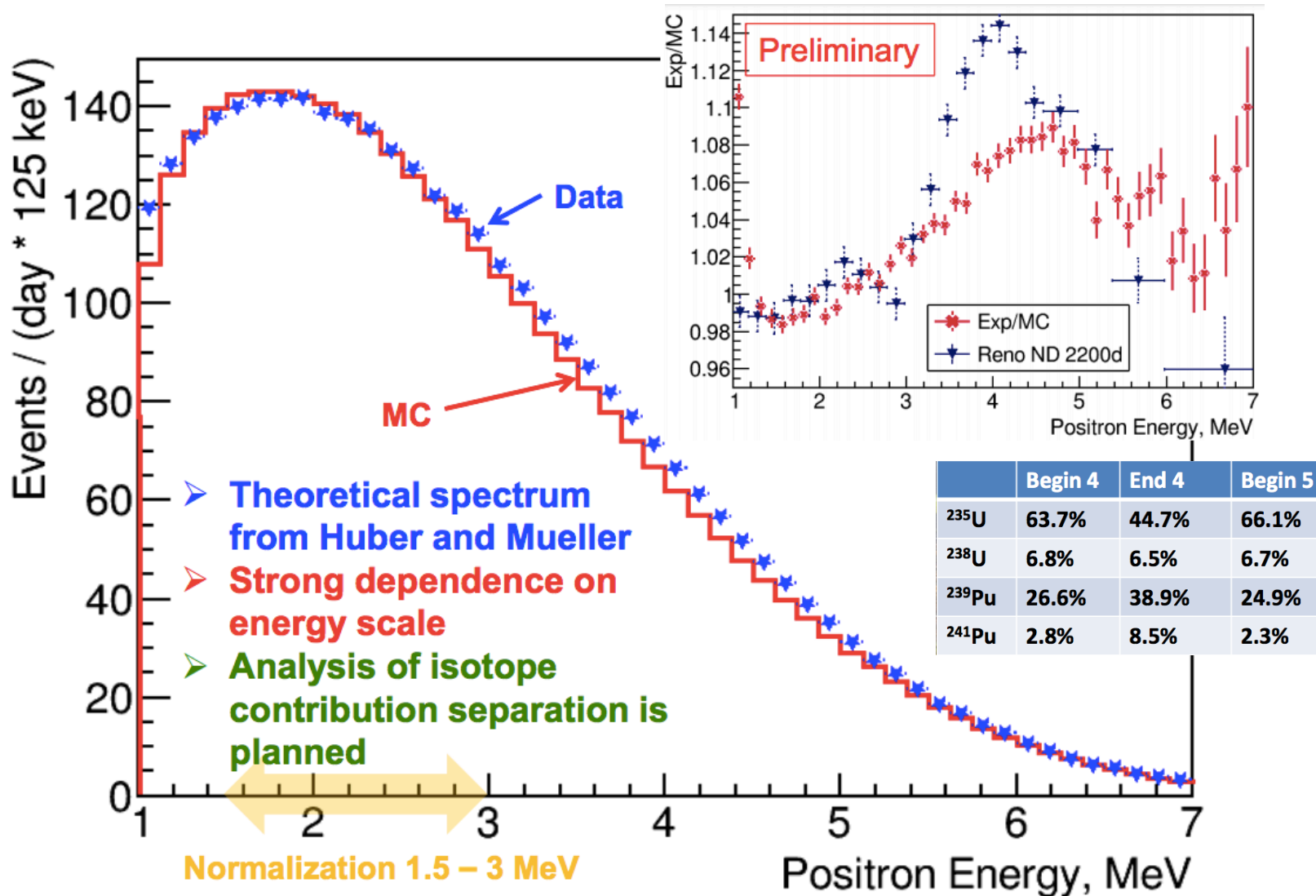
Experiment	P_{th} [MW]	L [m]	Depth [mwe]	M [t]	Technique	S/B
NEOS	2700	25	20	1	Gd-LS	22
DANSS	3100	10–12	50	0.9	Gd-PS	~20
Neutrino-4	100	6–11	5–10	1.5	Gd-LS	<1
STEREO	57	9–11	10	1.7	Gd-LS	0.9
SoLid	80	6–9	10	1.6	^6Li -PS	0.3
PROSPECT	85	7–9	<1	4	^6Li -LS	>1



Résultats oscillation

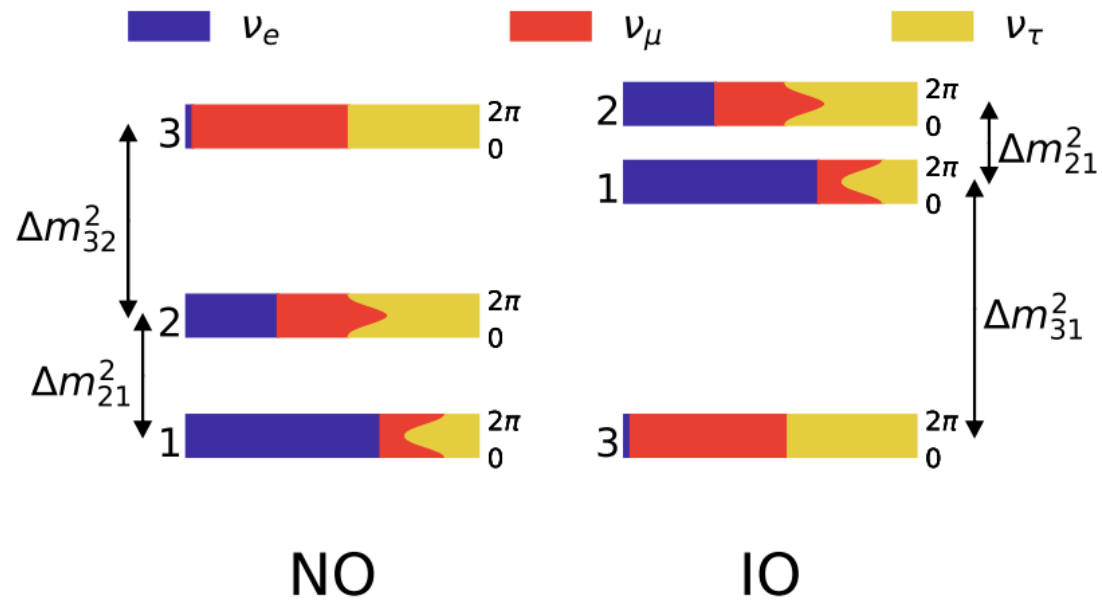
DANSS (présenté à TAUP 2019)

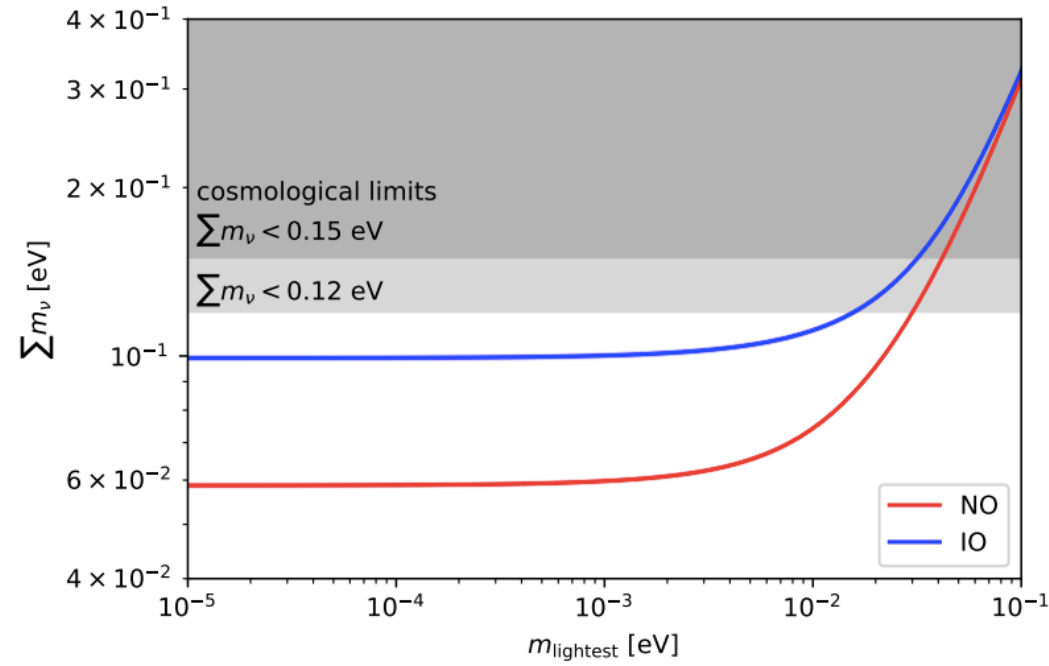
4 Millions de neutrinos
Amélioration des incertitudes systématiques
Plus de signe d'oscillation !



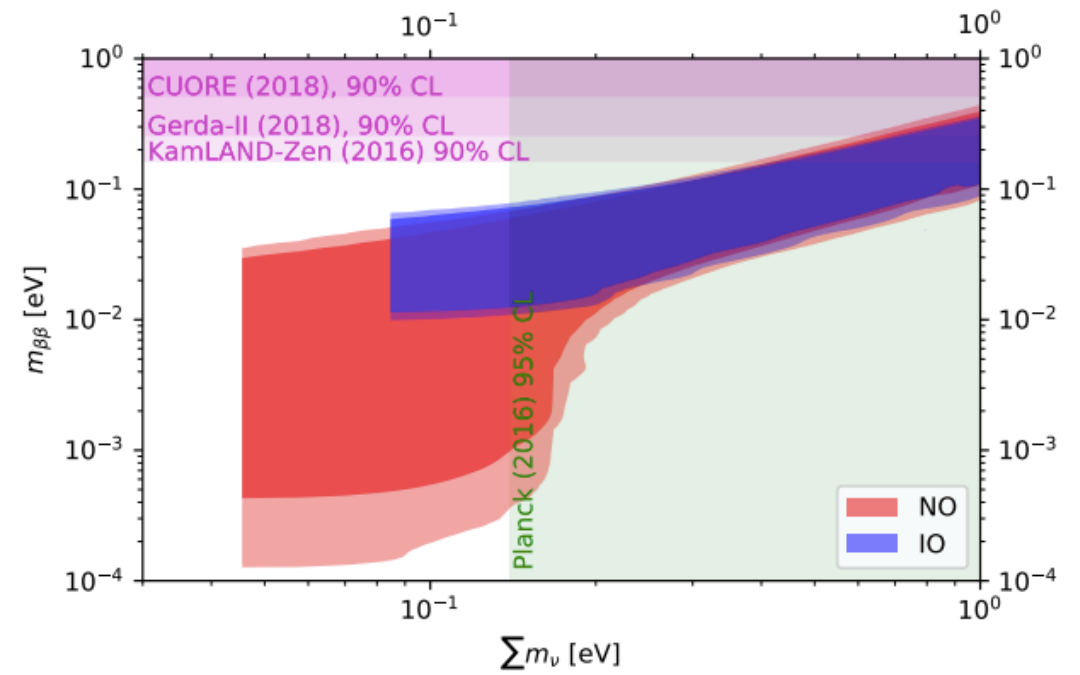
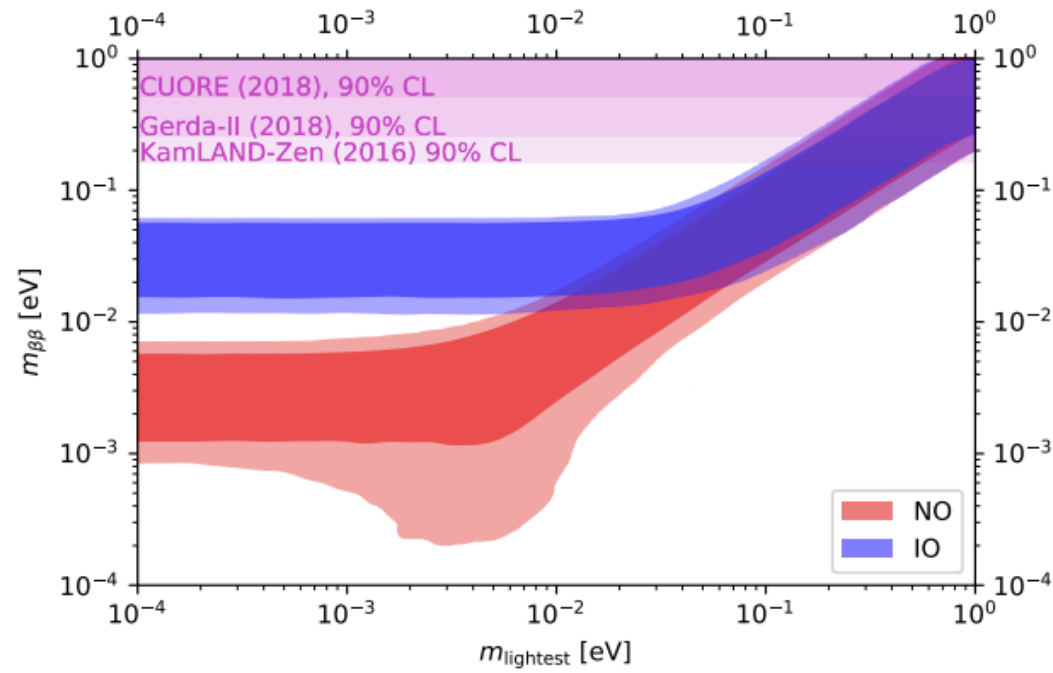
Analyses globales

BACK-UP

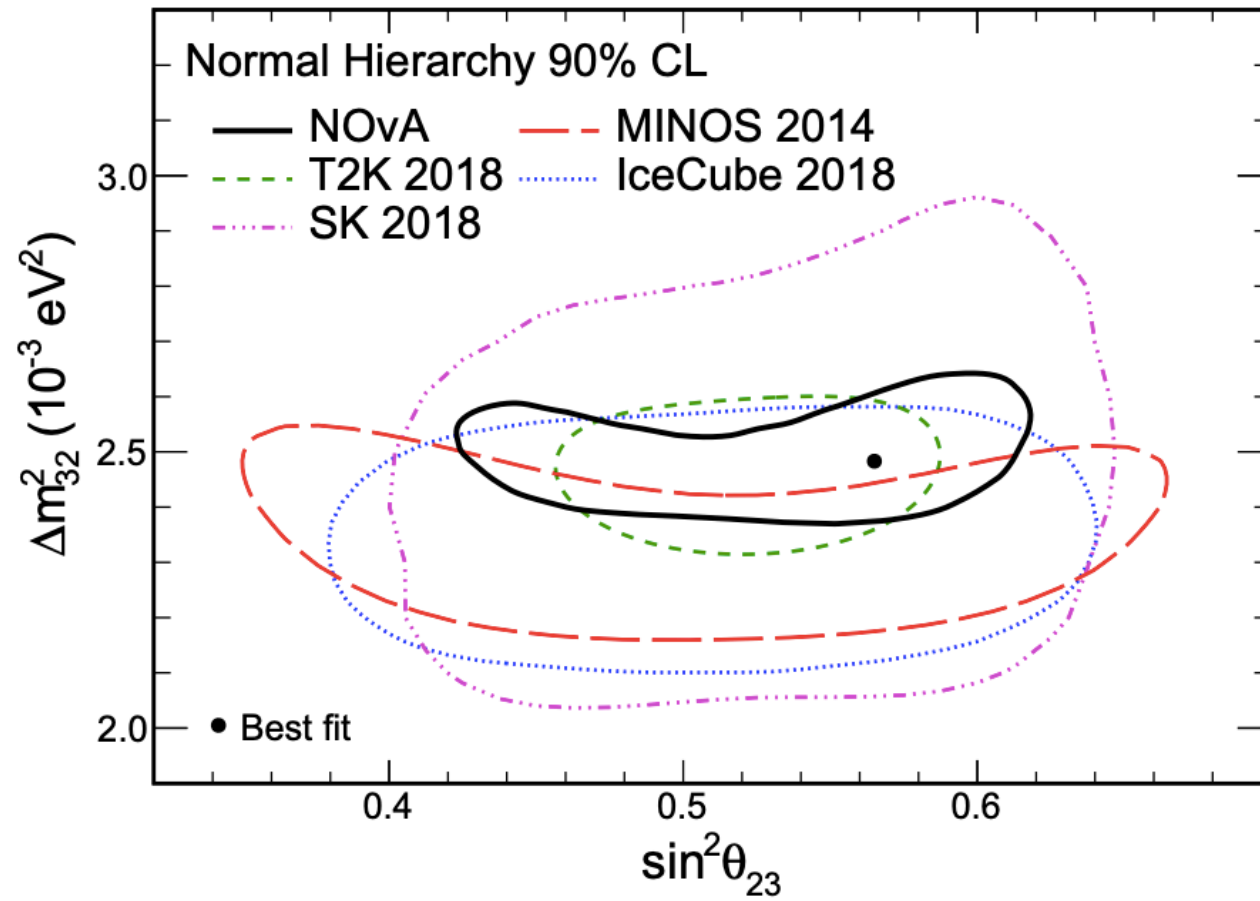




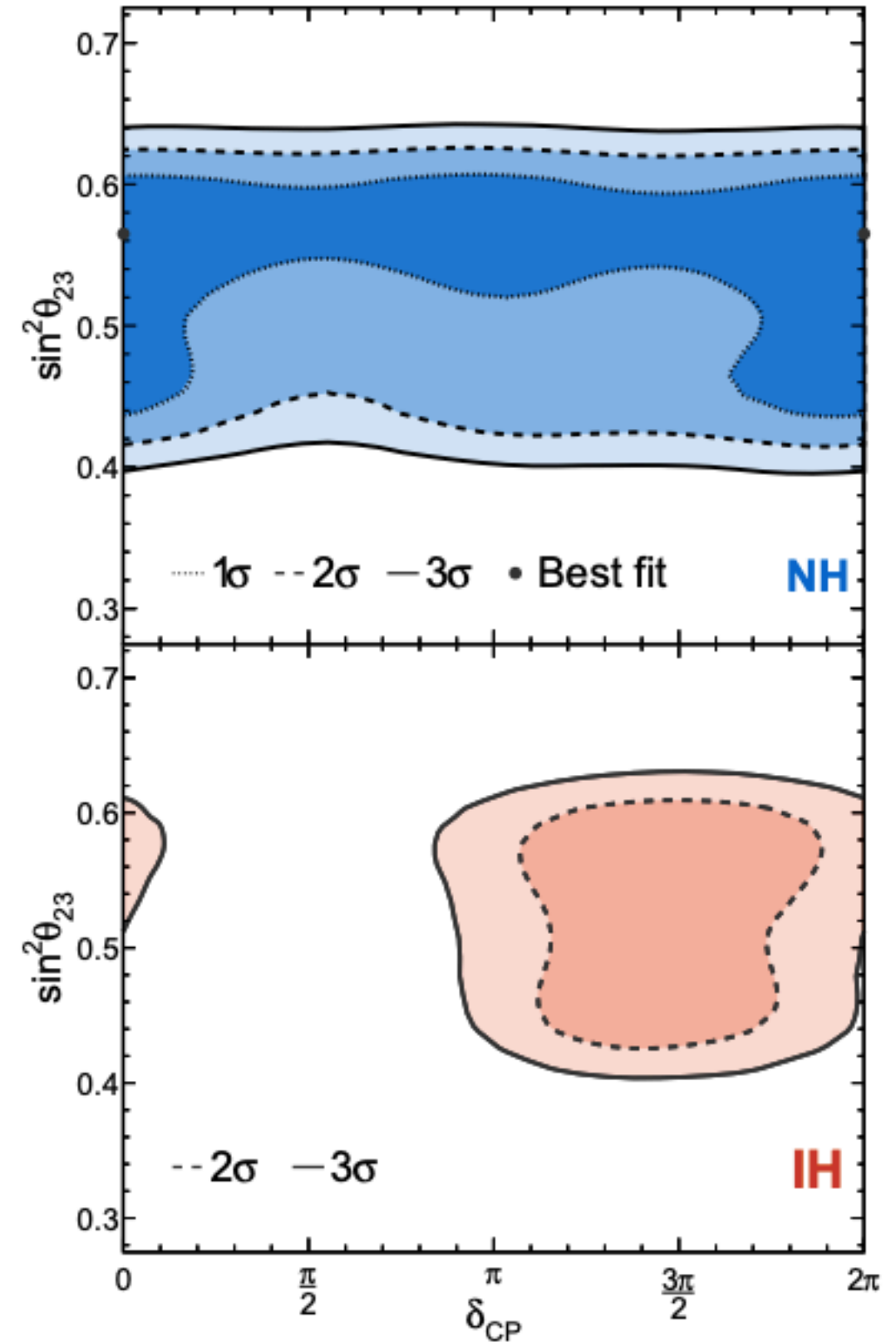
arXiv : 1806.11051

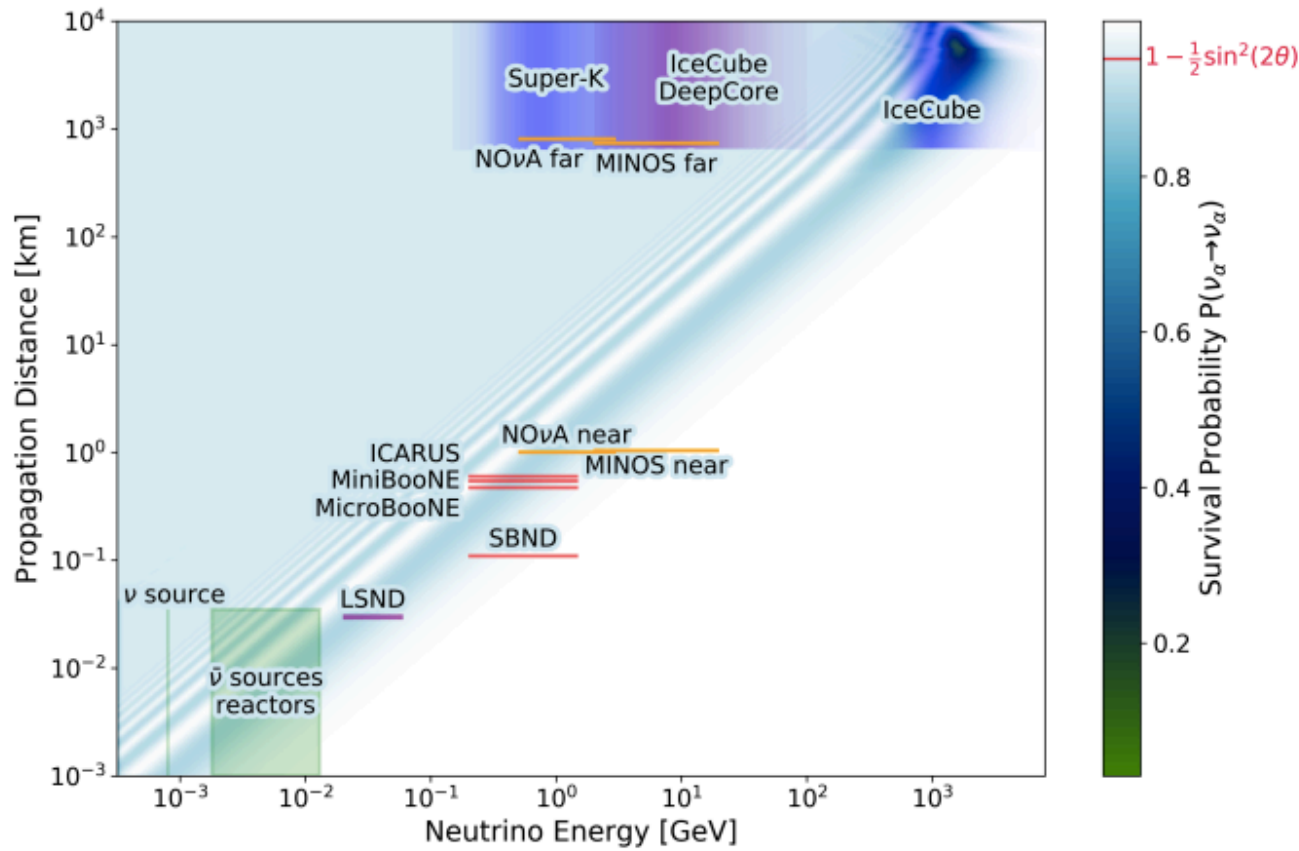


arXiv : 1906.04907



Résultats de Nova sur l'octant et delta CP

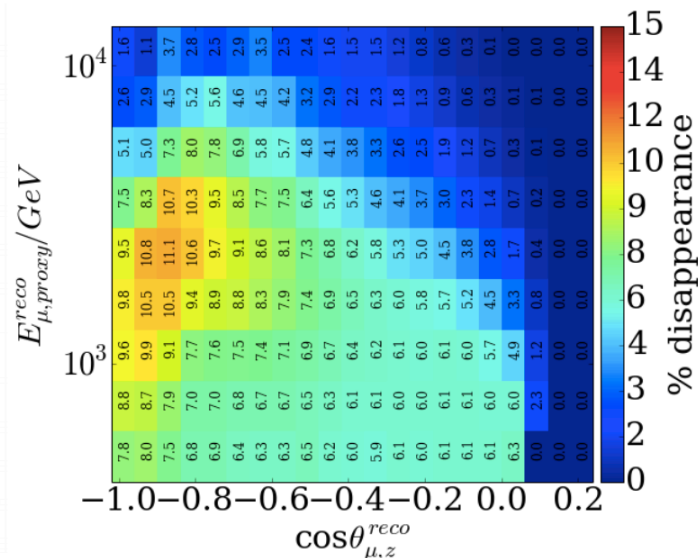
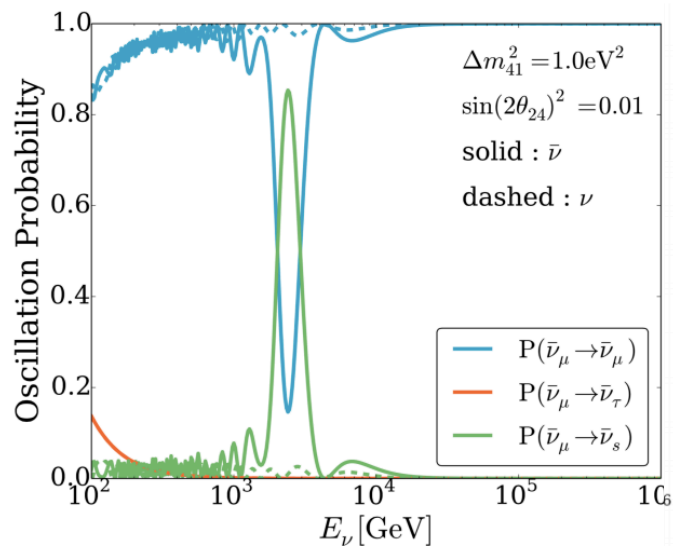
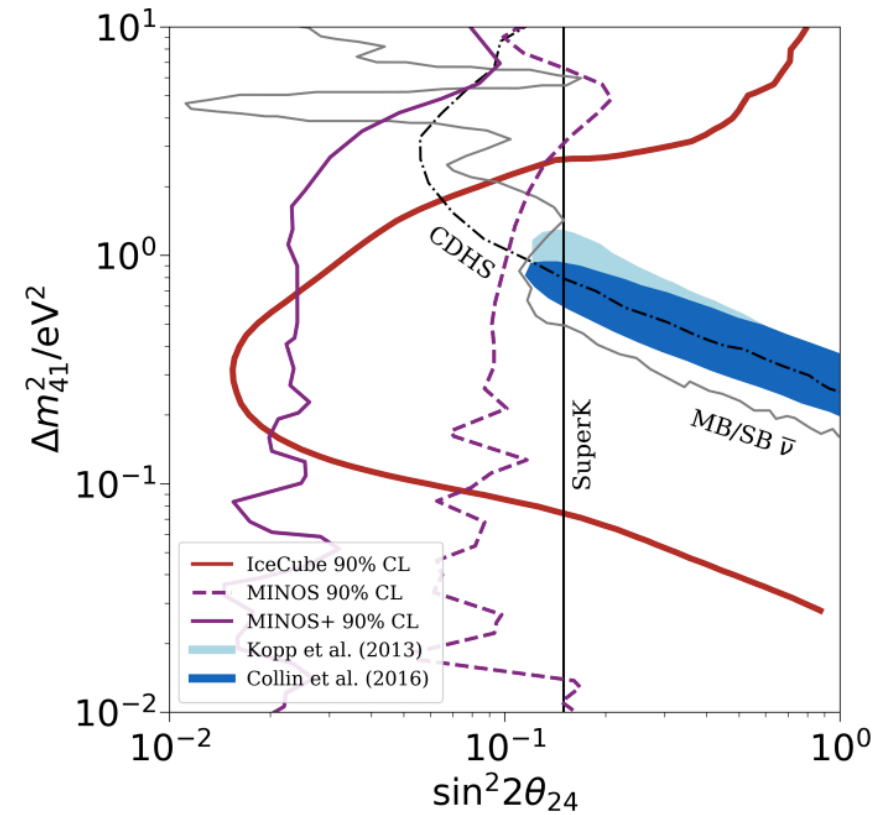




arXiv : 1906.01739

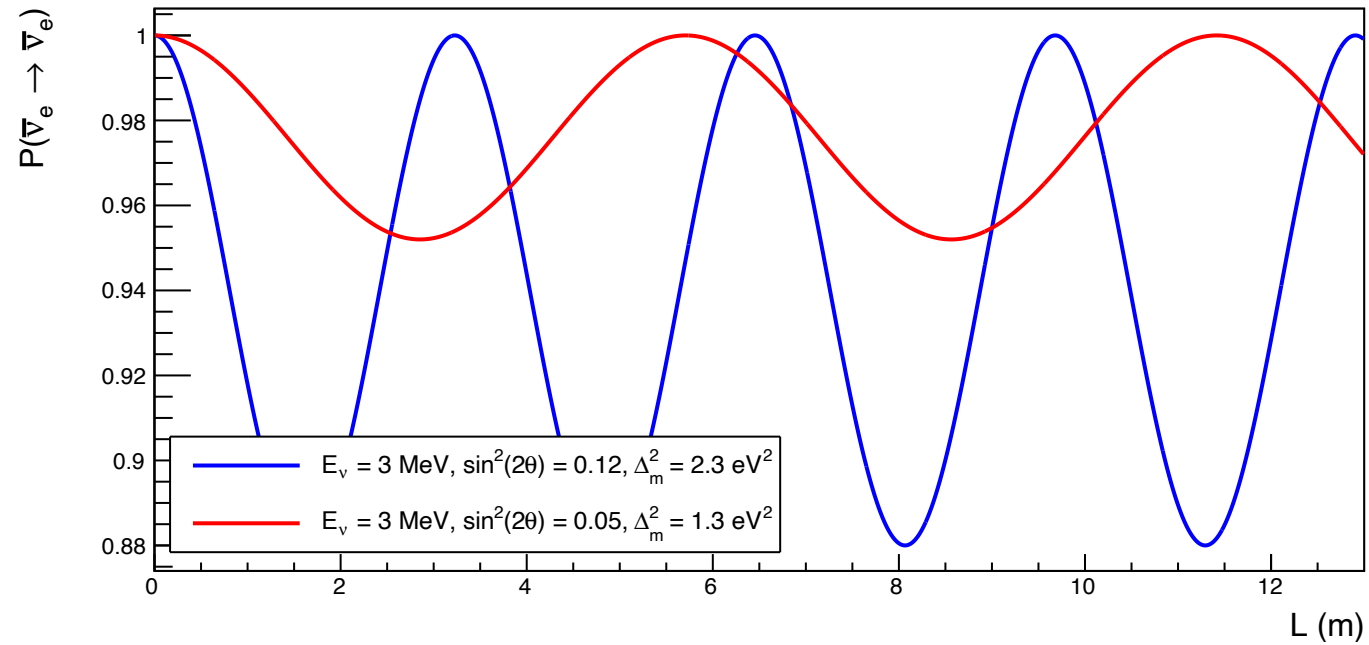
Contraintes posées par le secteur atmosphérique (SuperKamiokande, IceCube, DeepCore)

Probabilité de disparition des antineutrinos fortement amplifiée ~3 TeV (résonance effet matière)

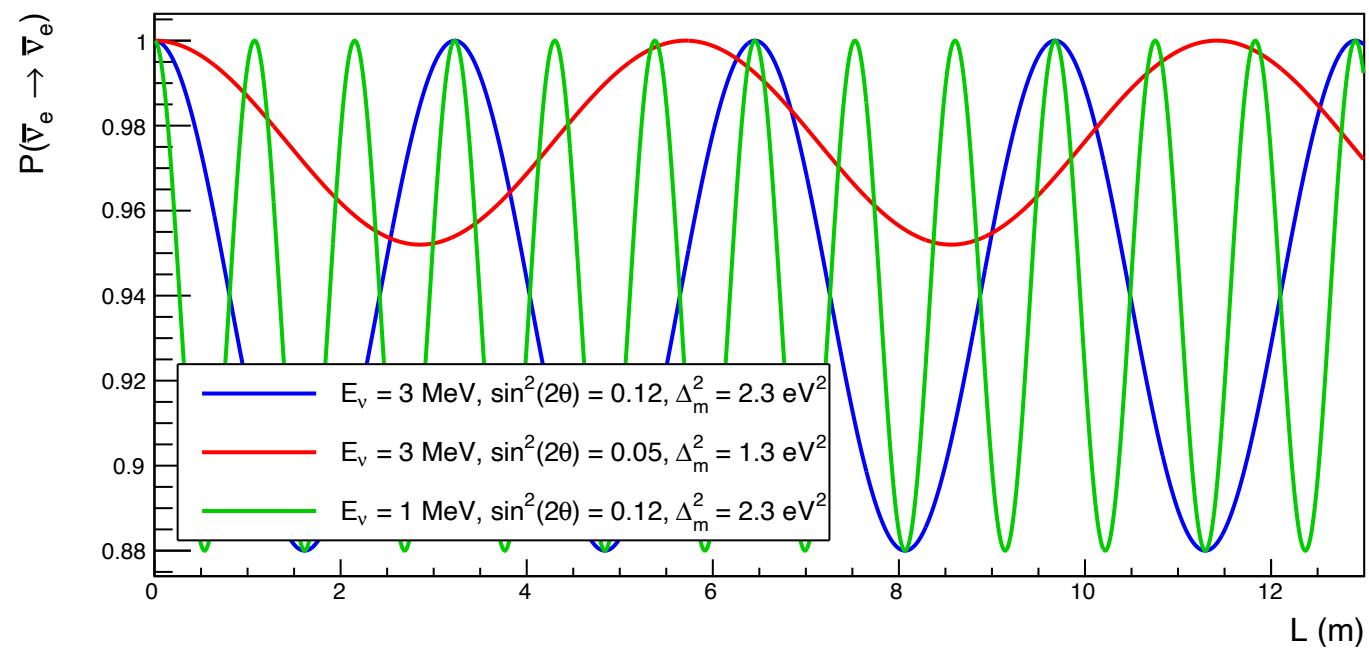


STEREO

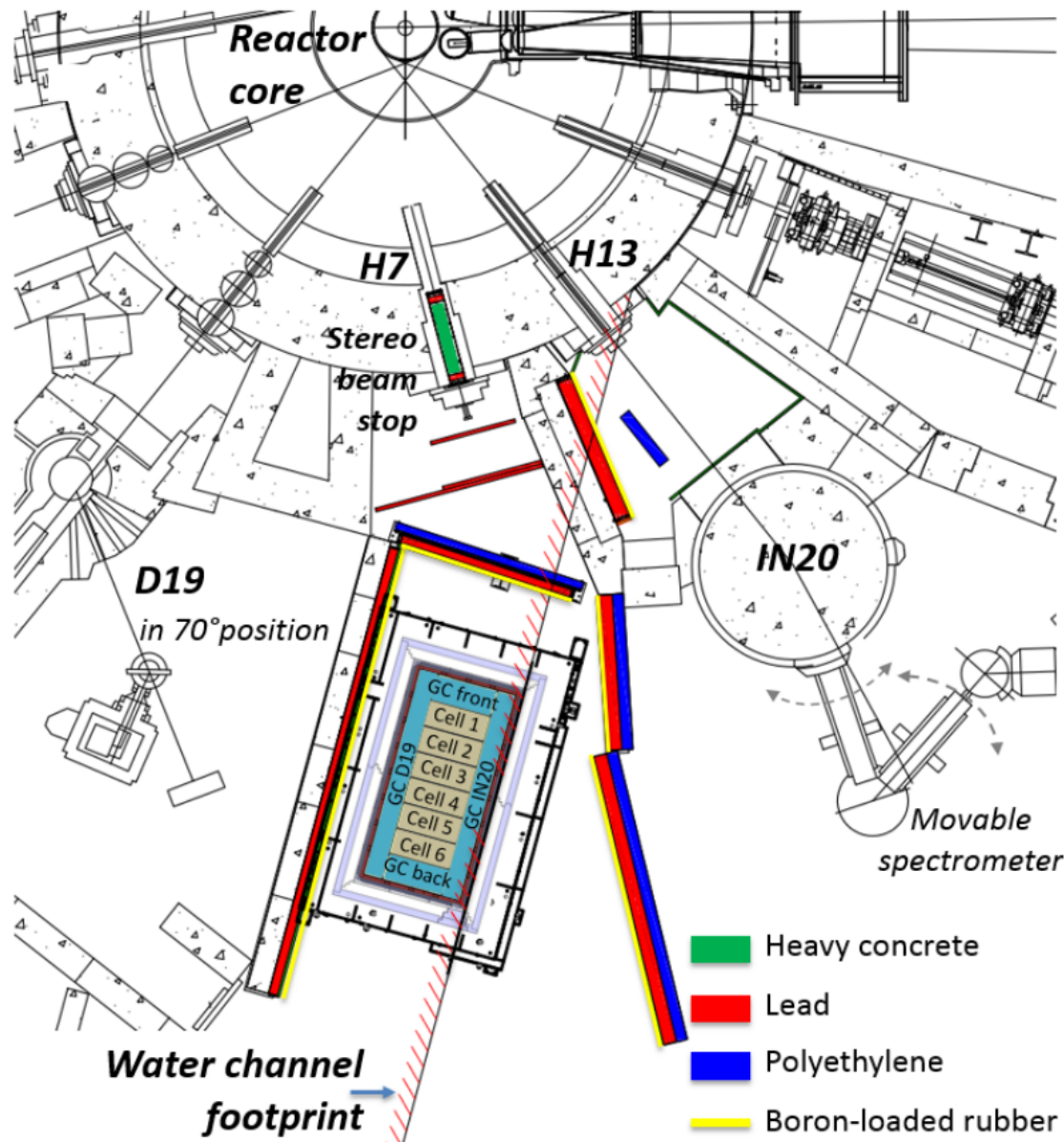
Impact de l'écart de masse et du $\sin^2(2\theta)$



Pour un neutrino à 3 MeV et à 1 MeV



- Bruits issus du fonctionnement du réacteur et blindages



Isotope	σ_{capt}^{therm} (barn)	A.N (%)	E_γ principales
^1H	0.33	~100.0	2223 (100%)
^{56}Fe	2.59	91.8	7631 (29%) 7646 (25%)
^{27}Al	0.23	100.0	7724 (27%)
^{56}Cu	4.47	69.2	7916 (33%)

Captures radiatives pertinentes pour la mesure du bruit de fond γ lorsque le réacteur est en fonctionnement.

Polyéthylène = thermalisation des neutrons

Plomb = capture des gamma

B4C = capture des neutrons thermiques

} éviter captures sur les structures

Scintillateur liquide

Transparence, rendement lumineux, sécurité (réacteur nucléaire), compatibles avec les matériaux du détecteur

LAB (linear alkyl benzene) — 75% (solvant, transparent à 430 nm)

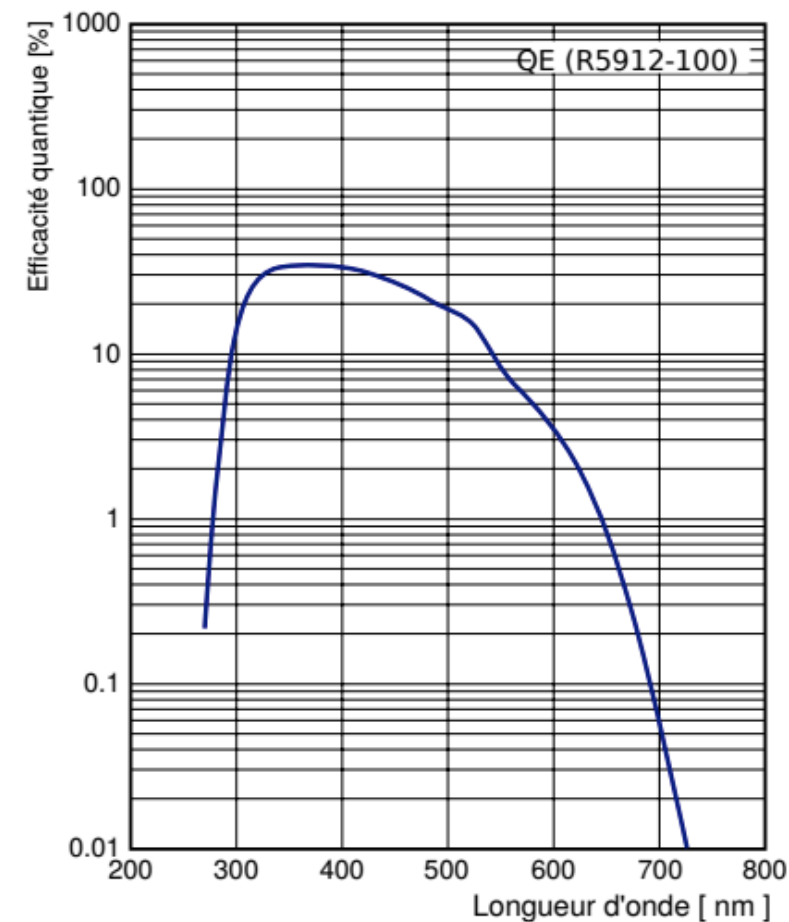
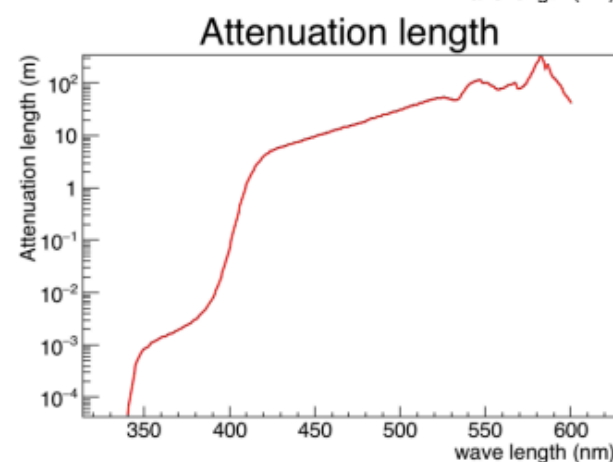
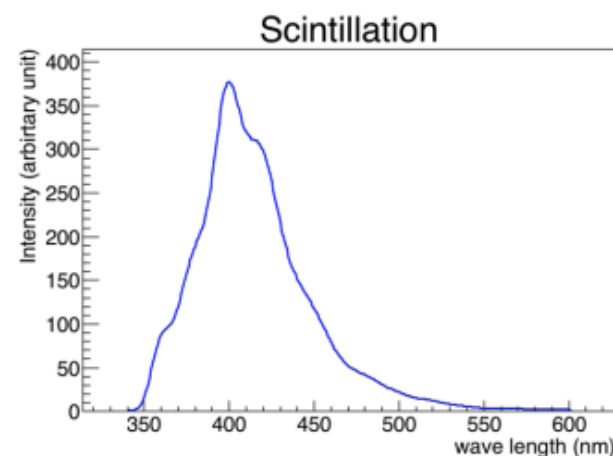
PXE (ortho-phenyl-xyliletane) — 20% (augmentation du rendement lumineux)

DIN (di-isopropyl-naphtalene) — 5% (augmentation du rendement lumineux & ++ pour la PSD)

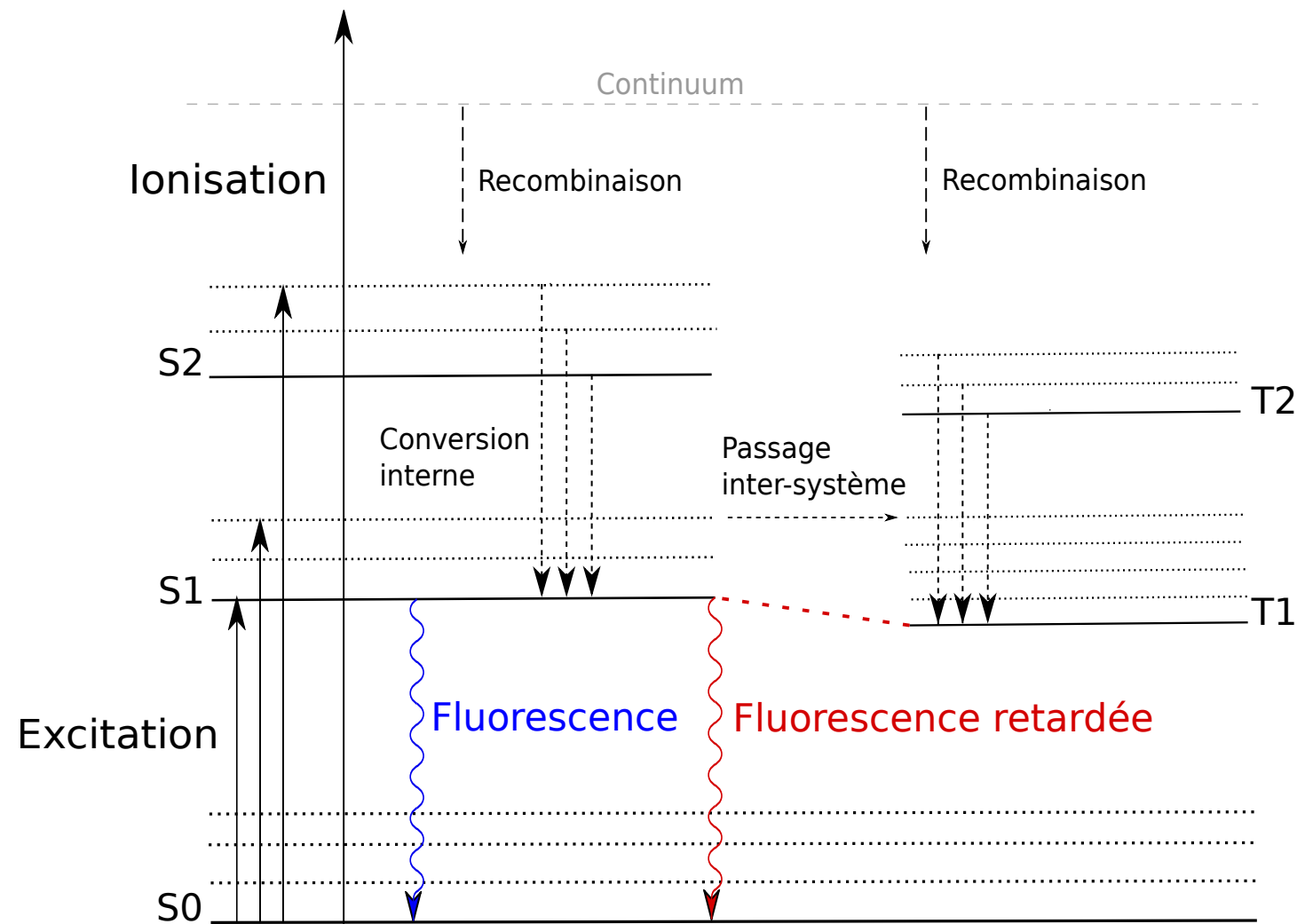
PPO (diphenyloxazole) (fluors, wavelength shifter)

bis-MSB (bismethylstyrylbenzene) (wavelength shifter)

	Rendement lumineux	Atténuati on
Cible	6500 (ph/MeV)	6.9 m
Gamma-catcher	8400 (ph/MeV)	9.7 m

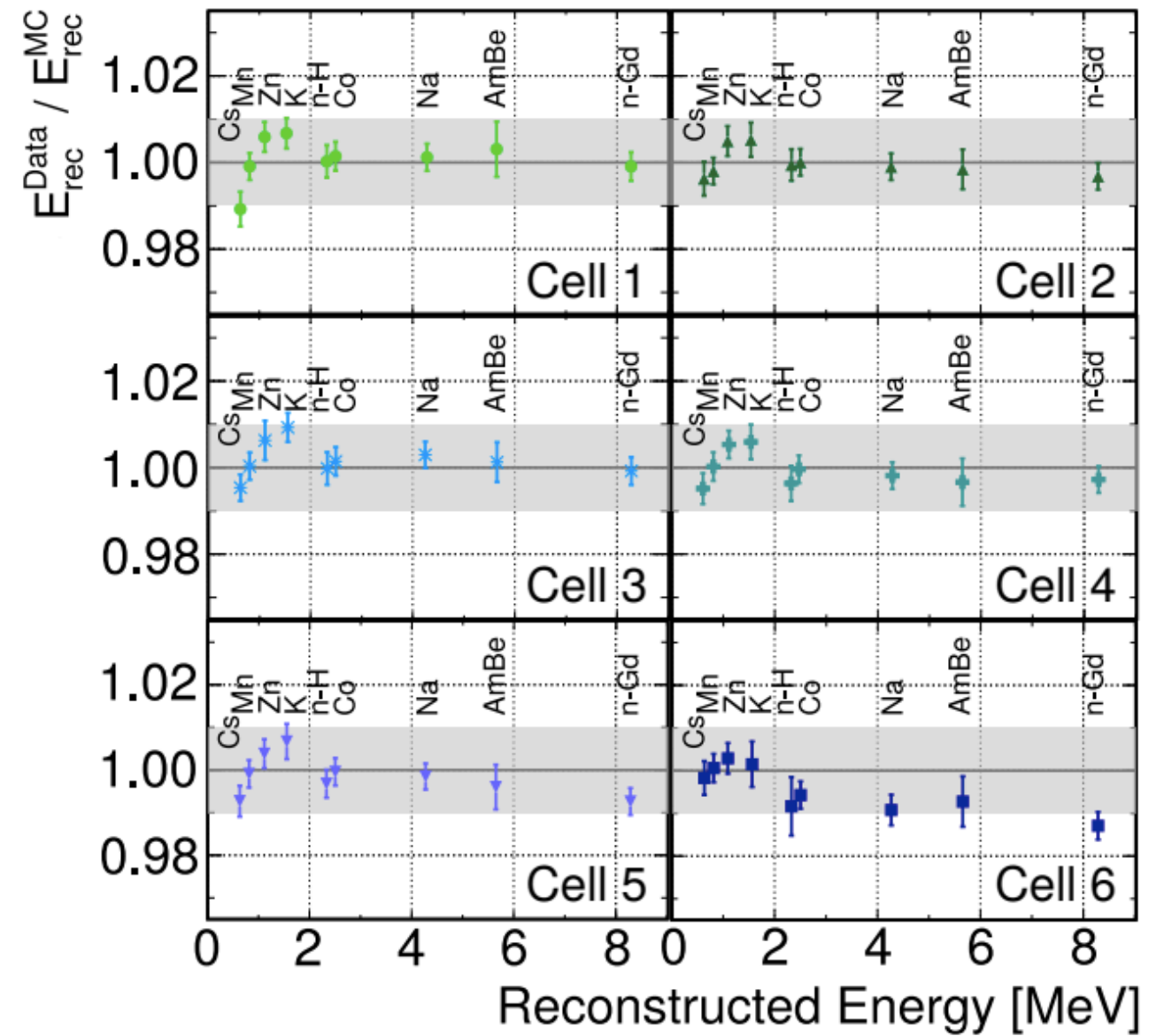
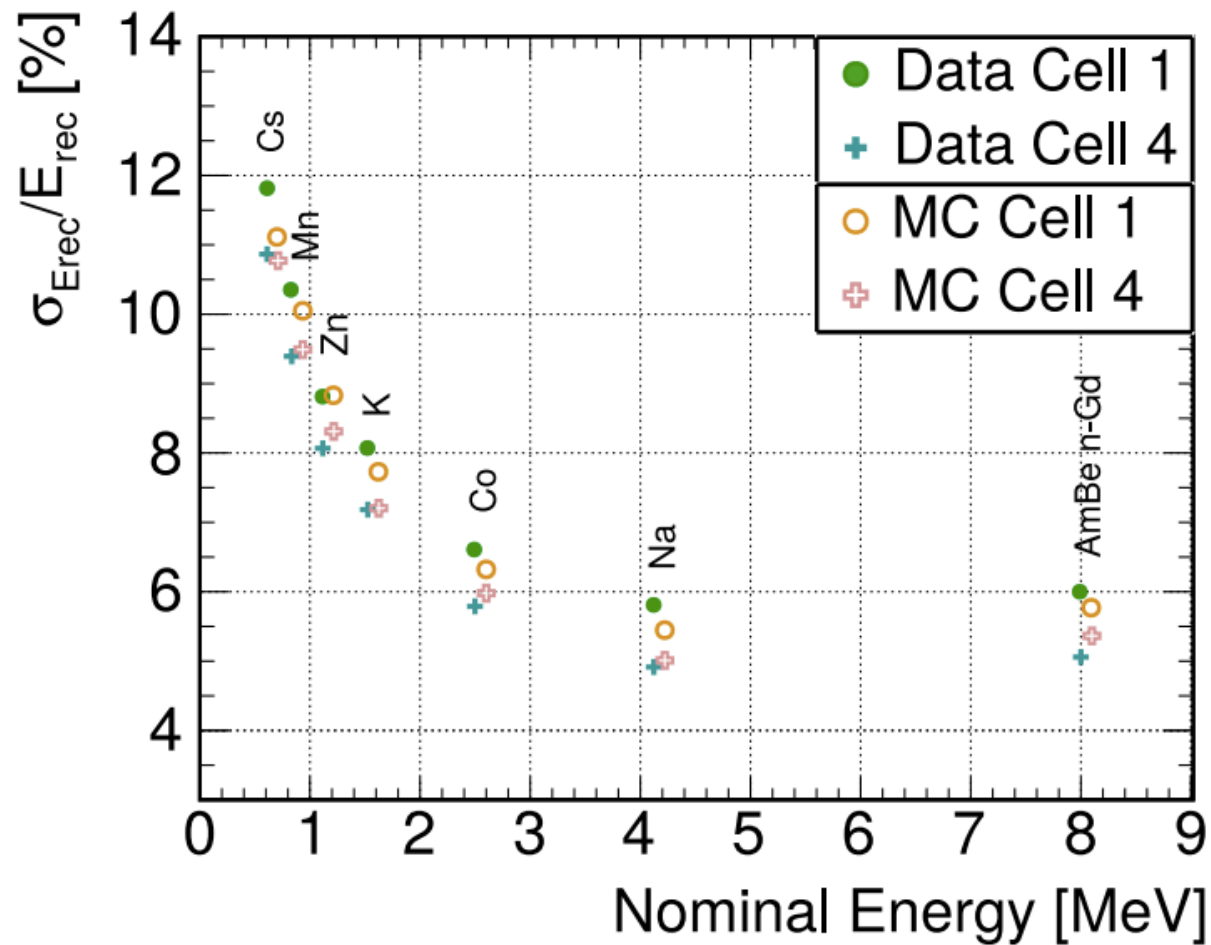


Pulse Shape Discrimination , liquide scintillant :

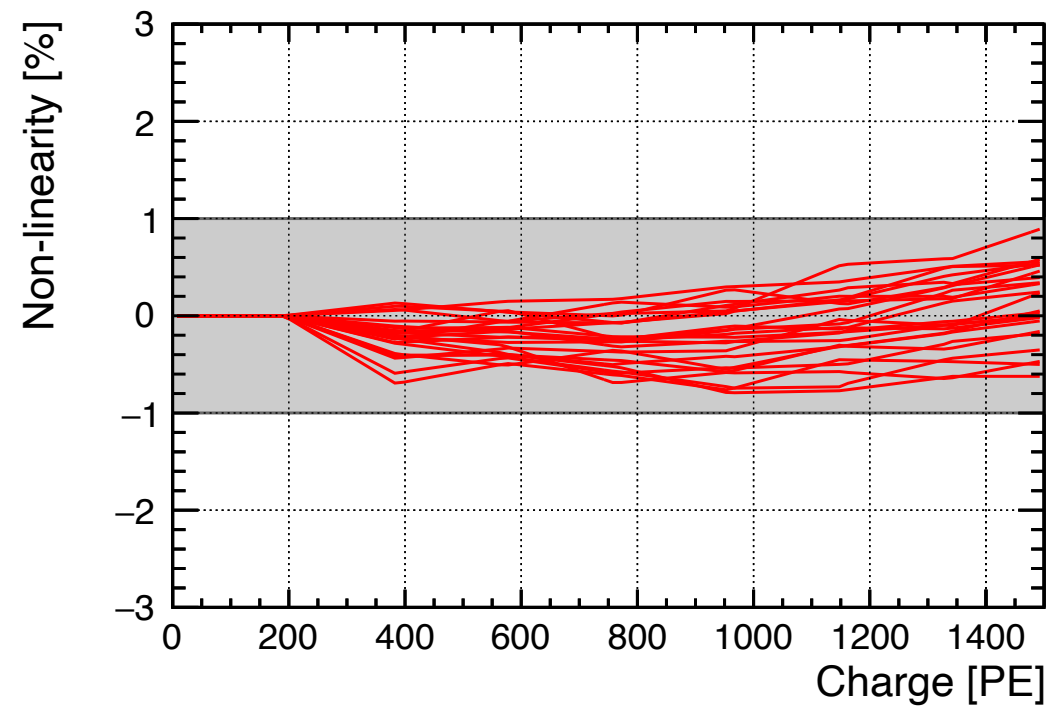
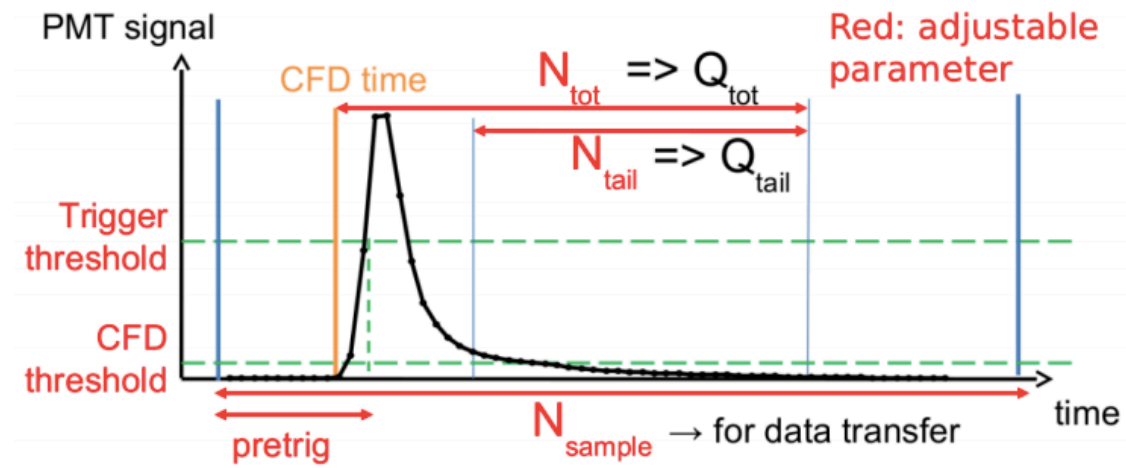


Étalonnage de l'énergie

Comportement en $1/\sqrt{E}$ + constante



Electronique : non-linéarités contenues dans +/- 1%



Reconstruction de l'énergie

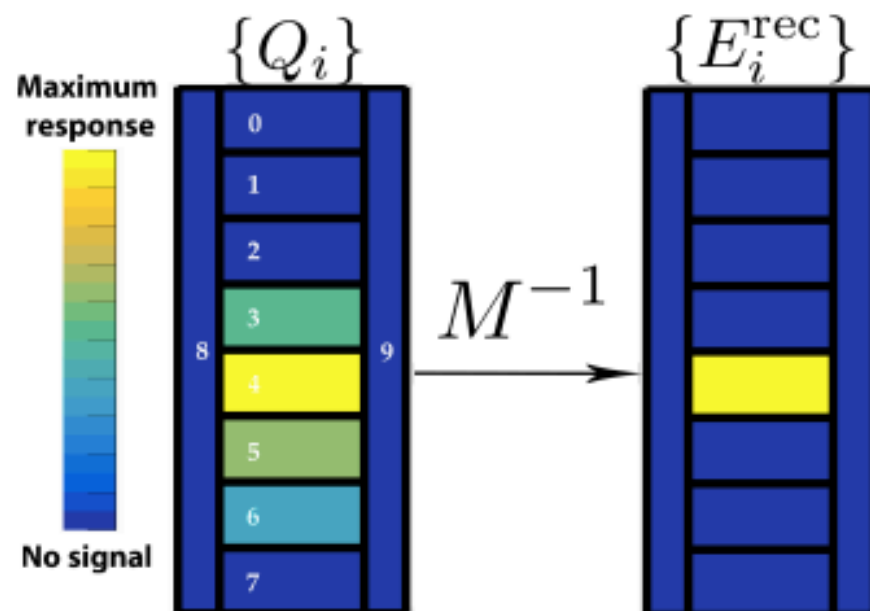
Étalonnages en énergie : charge Q associée à une énergie déposée

Fuites de lumière vers les GC : rendement lumineux différent

Phase-I : perte d'un facteur 2.5 de la collection de lumière dans 2 cellules

Fuites de lumière entre cellules : évolution dans le temps

- Besoin d'une méthode de reconstruction de l'énergie



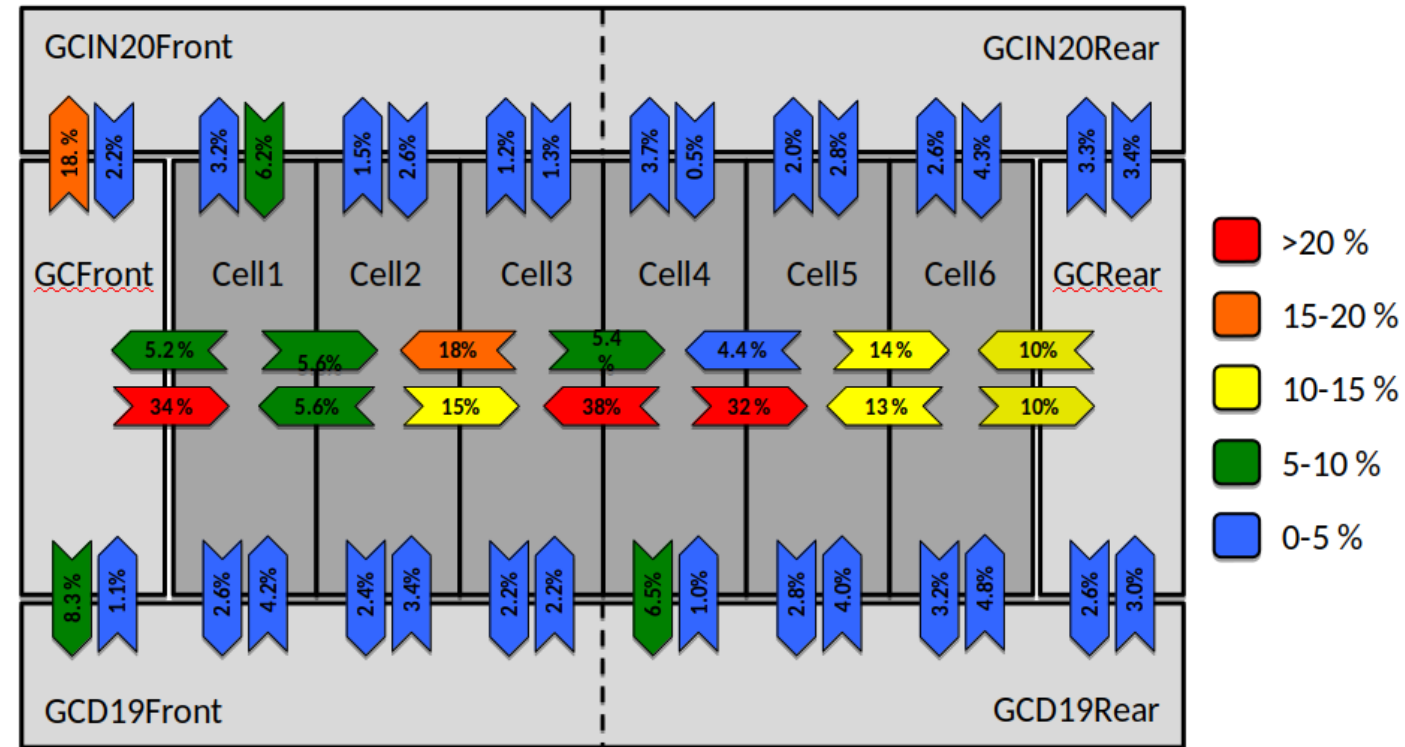
$$Q_i = \sum_{j=\text{cells}} E_j C_j L_{ji}$$

Collected photons/MeV
from calib runs

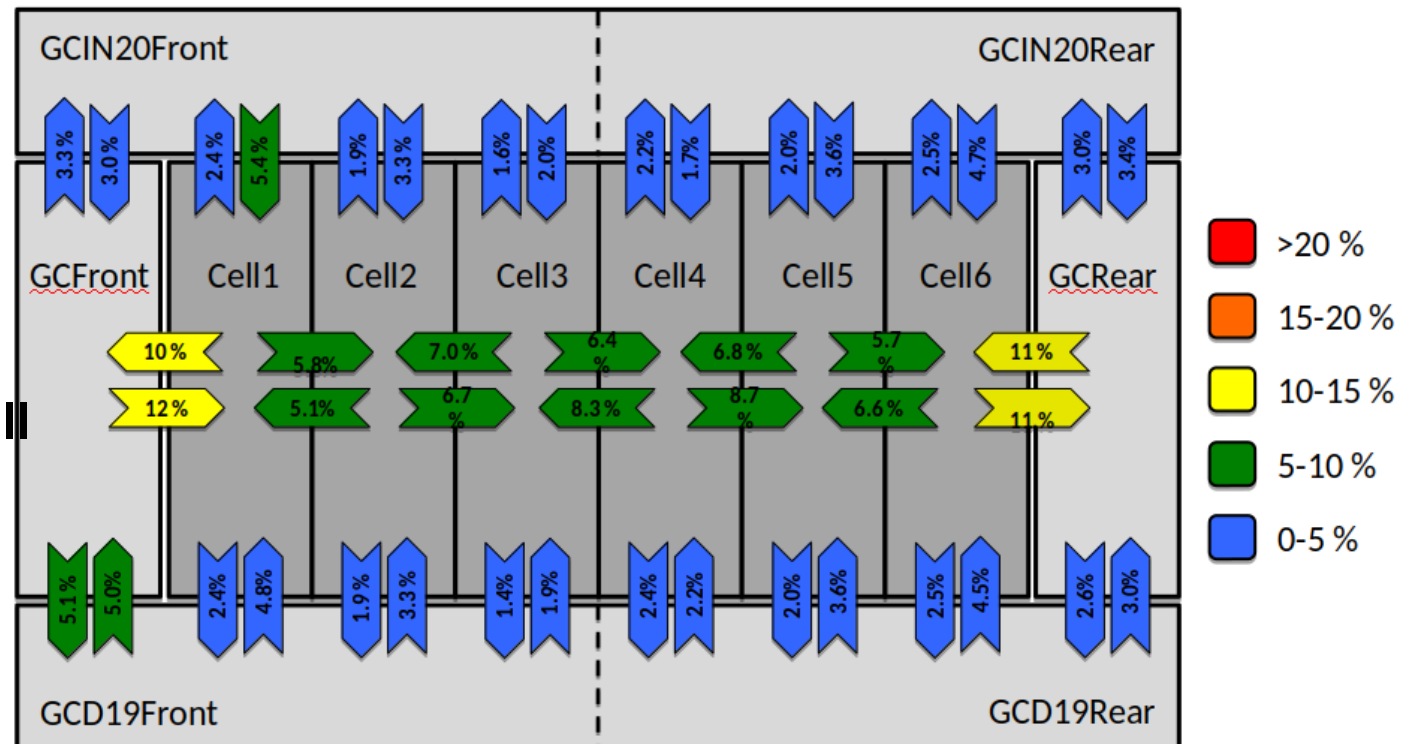
Light cross-talk
between cells
Measured online + calib

Fuites de lumière

Fin de Phase-I



Début de Phase-II



Contrainte de l'échelle en énergie

➤ spectre continu du Bore12 et points d'étalonnage dans un unique ajustement global

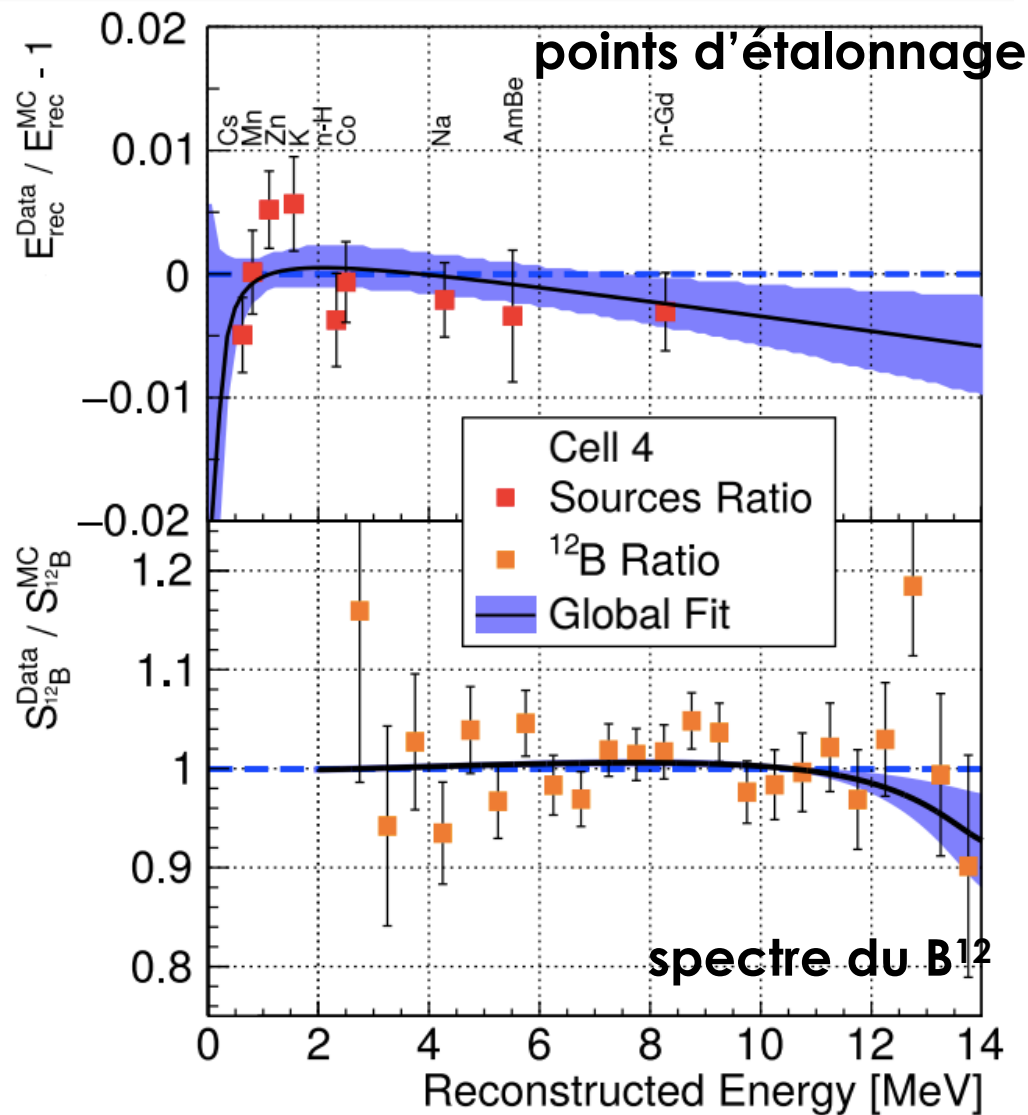


FIG. 15. Example of a combined fit of sources (top) and boron data (bottom) in cell 4 with a distortion of the energy scale. The experimental energy scale is assumed to be a second order polynomial of the simulated energy scale. The red (orange) points are the Data/MC ratios of sources (boron) data and the blue shaded area is the uncertainty band of the fit.

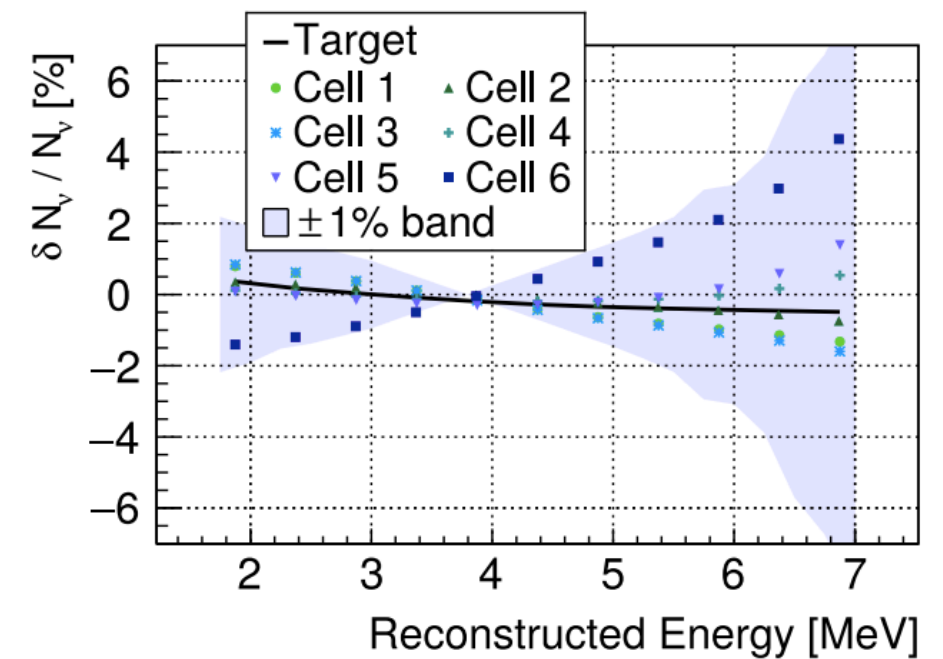
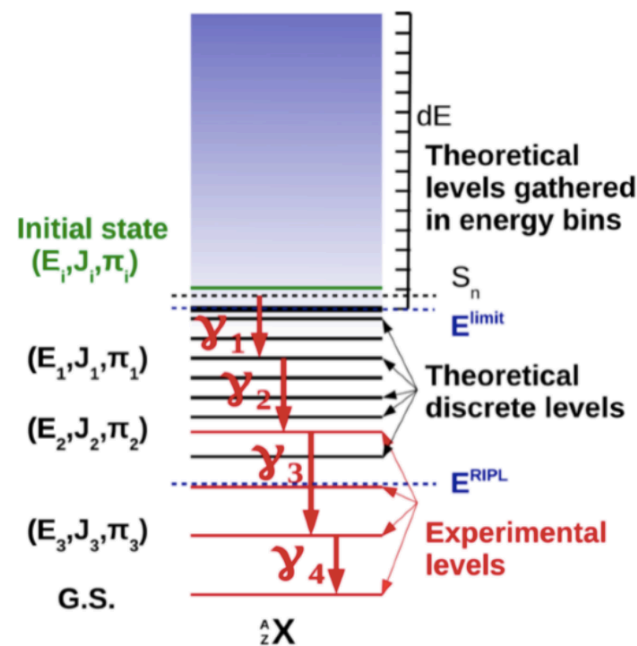


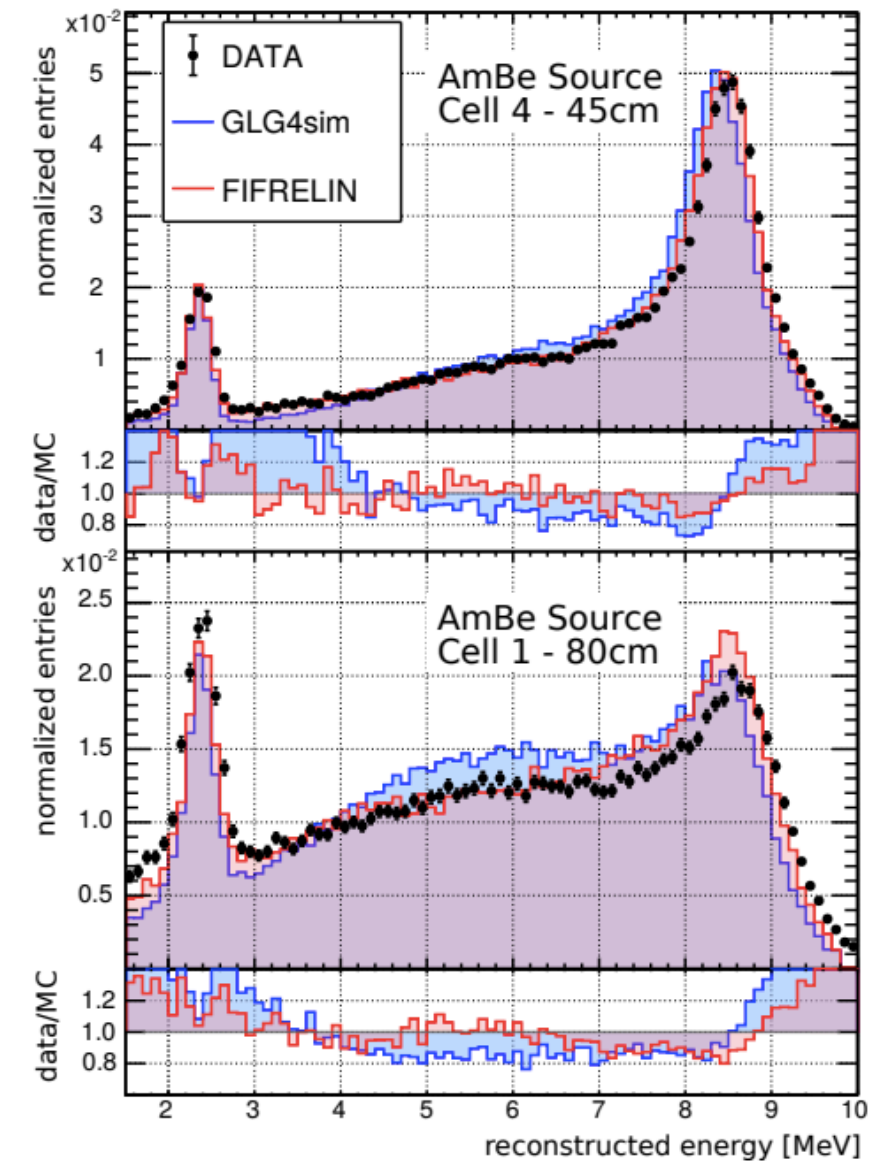
FIG. 16. Impact of the fitted distortions of energy scale on the detected IBD spectrum for each cell and for the entire TG. The limits of the blue shaded area are drawn from a $\pm 1\%$ bias on the linear calibration coefficients.

- **FIFRELIN** : code Monte-Carlo développé au CEA de Cadarache, décrit les désintégrations des produits de fission et d'isotopes instables



- Description des cascades gamma:
 - Densités de niveau générées par le modèle Composite Gilbert Cameron
 - L'énergie totale est conservée événement par événement
 - Contrôle de la multiplicité des gamma

- **Amélioration de la modélisation de la capture du neutron (source AmBe)**

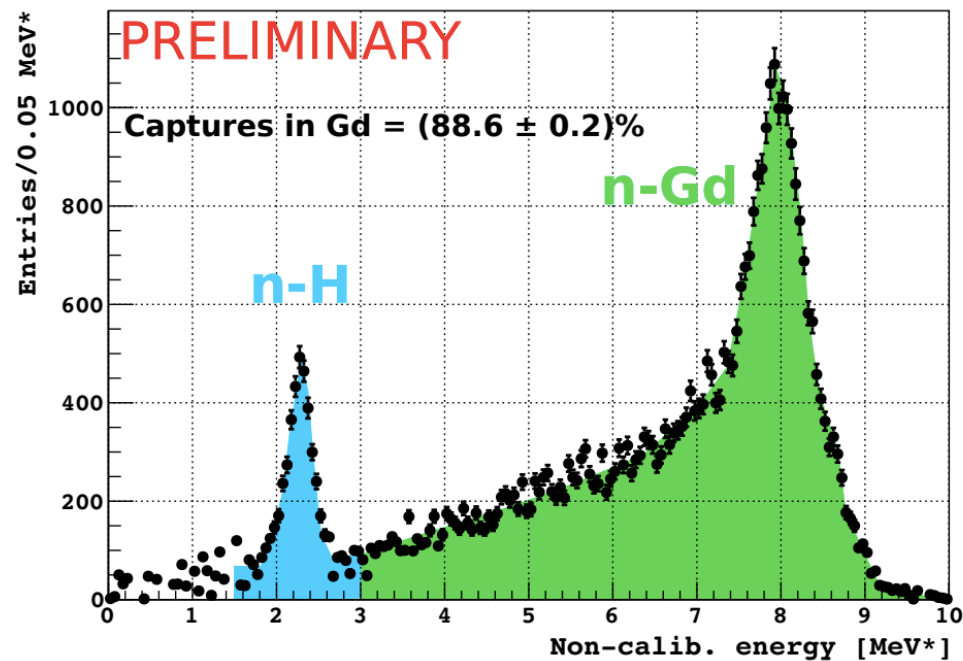


		Cell 4 (central) Central position	Cell 1 (border) Top position
$\epsilon_{Gd}^{Data} / \epsilon_{Gd}^{MC}$	GLG4sim	0.9744 ± 0.0003	0.9436 ± 0.0013
	FIFRELIN	0.9918 ± 0.0003	0.9682 ± 0.0013
$\epsilon_{IBD}^{Data} / \epsilon_{IBD}^{MC}$	GLG4sim	0.9814 ± 0.0004	0.9957 ± 0.0018
	FIFRELIN	1.0035 ± 0.0005	1.0091 ± 0.0019
$\epsilon_{tot}^{Data} / \epsilon_{tot}^{MC}$	GLG4sim	0.9562 ± 0.0005	0.9396 ± 0.0025
	FIFRELIN	0.9953 ± 0.0006	0.9770 ± 0.0022

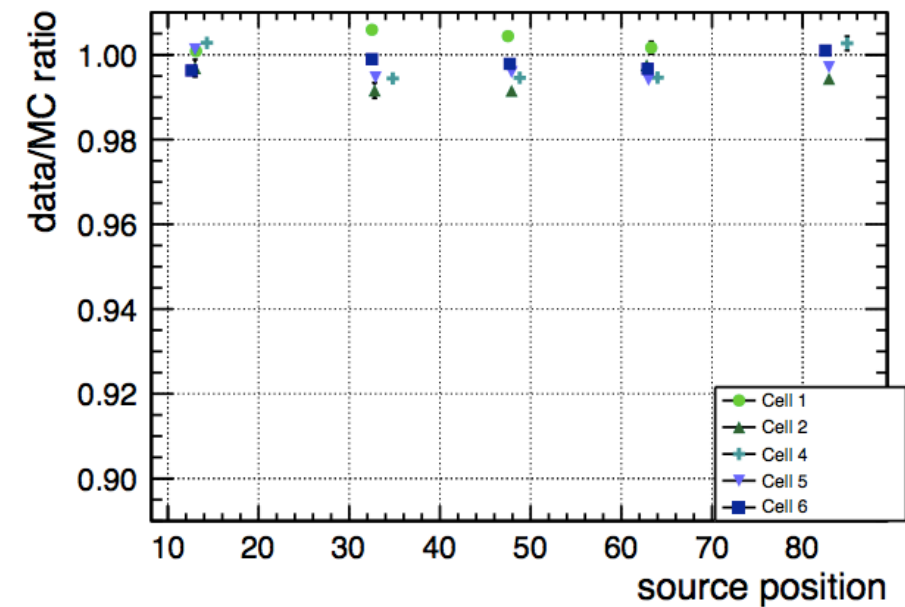
Efficacité de la capture n-Gd

- Diffère entre données et MC
- Impact de la sélection (coupures) →
- Fraction de captures sur le Gd/H →

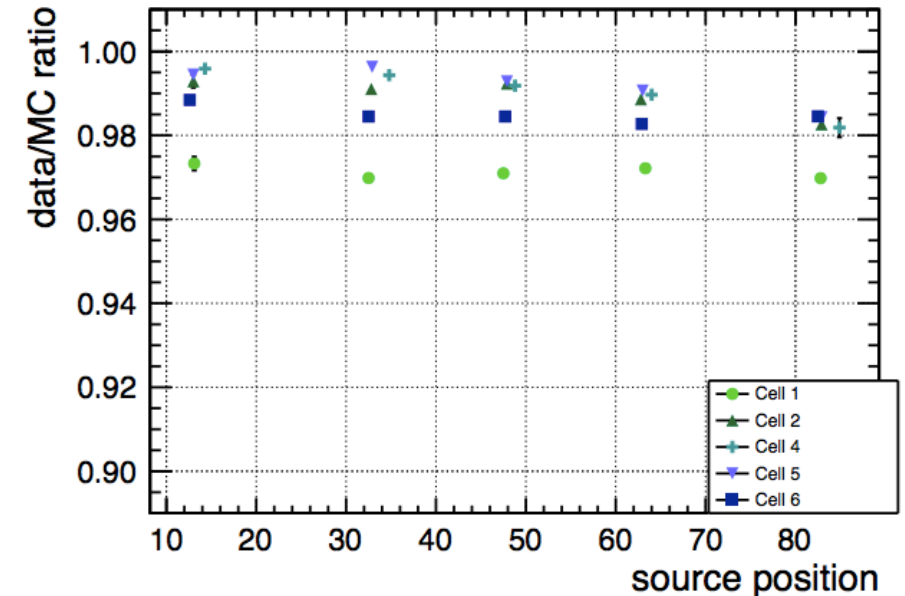
$$\epsilon_n^{\text{données}} = \epsilon_n^{\text{simu}} \cdot (C_{n\text{-capt}} \cdot C_{\text{coupures}})$$



Homogeneity of the IBD cut efficiency



Homogeneity of the Gd-fraction



Incertitude sur la correction : variation dans le temps des facteurs de correction ($\sim 0.1\%$), estimation du biais sur la position exacte de la source ($\sim 0.25\%$), et écarts observés entre cellules et hauteurs de placement des sources ($\sim 0.5\%$)

Signal et bruits de fond

Recherche de paires accidentelles

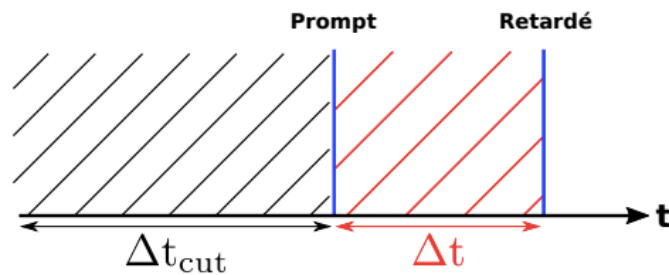
Probabilité d'accepter une paire corrélée :

$$P_{Corr}(\Delta T_{cut}, \Delta T, \tau) = P^P(\Delta T_{cut}, \Delta T) P^R(\Delta T_{cut}, \Delta T) e^{-(\Delta T_{cut} + \Delta T)\tau}$$

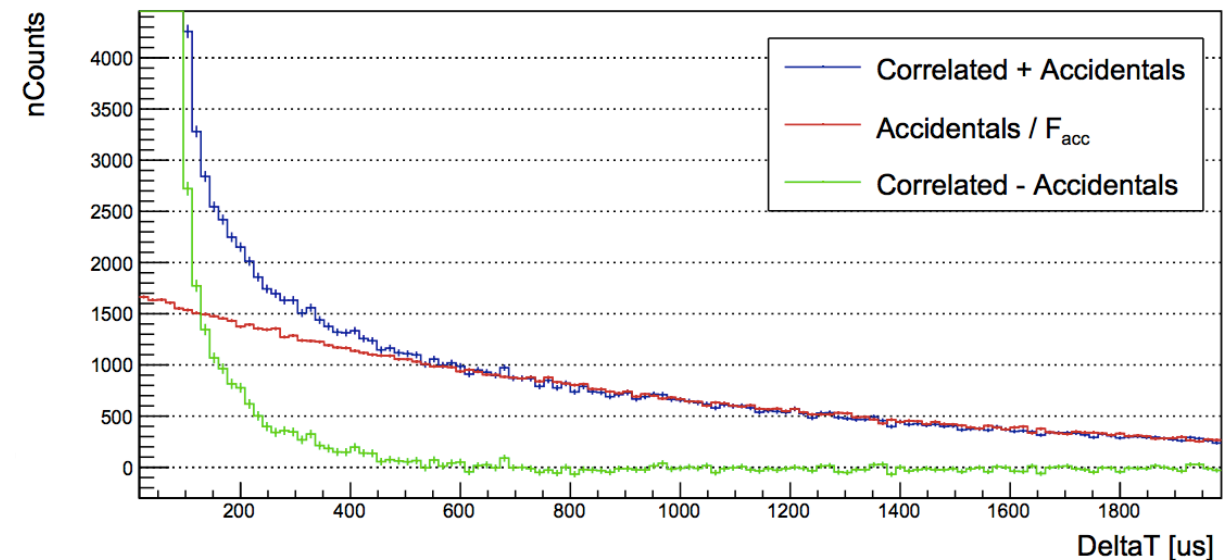
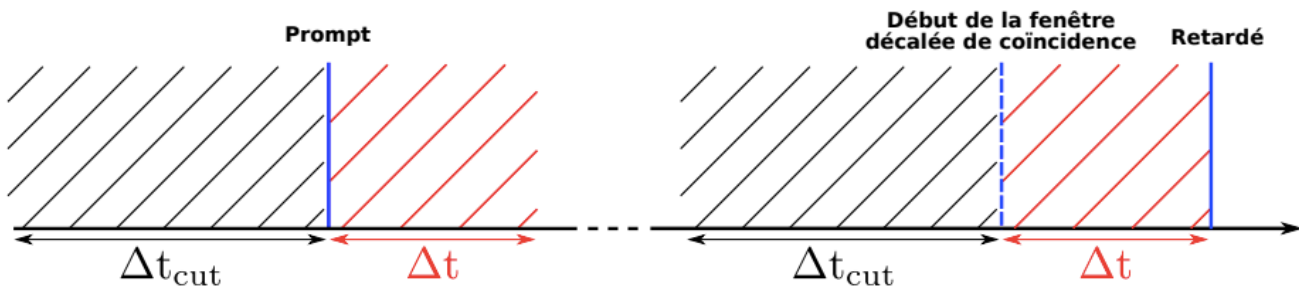
Proba indépendantes que le P et R ne soient pas corrélés à un évènement simple

Proba de ne pas avoir d'évènement simple dans une fenêtre de $\Delta t + \Delta t_{cut}$

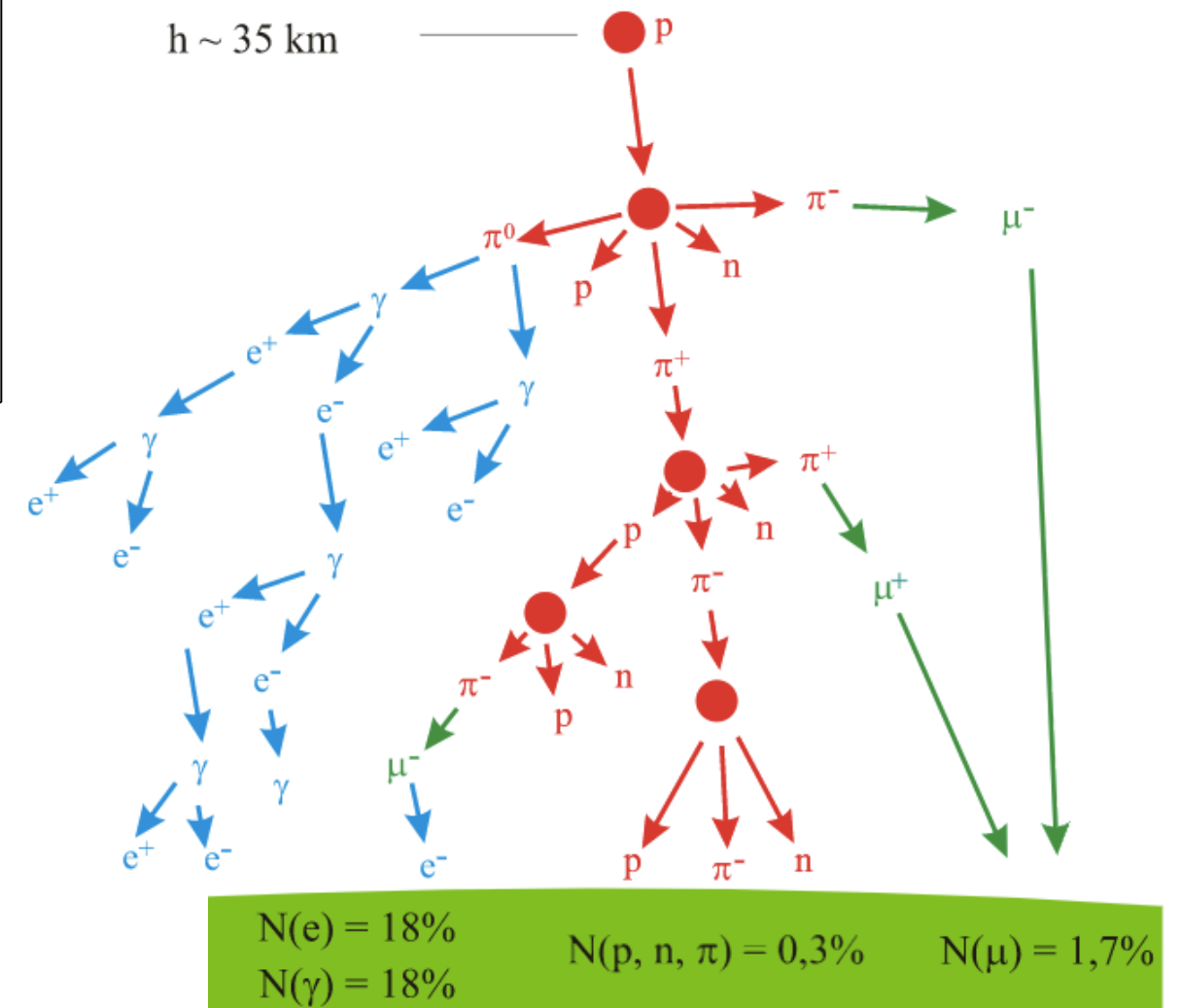
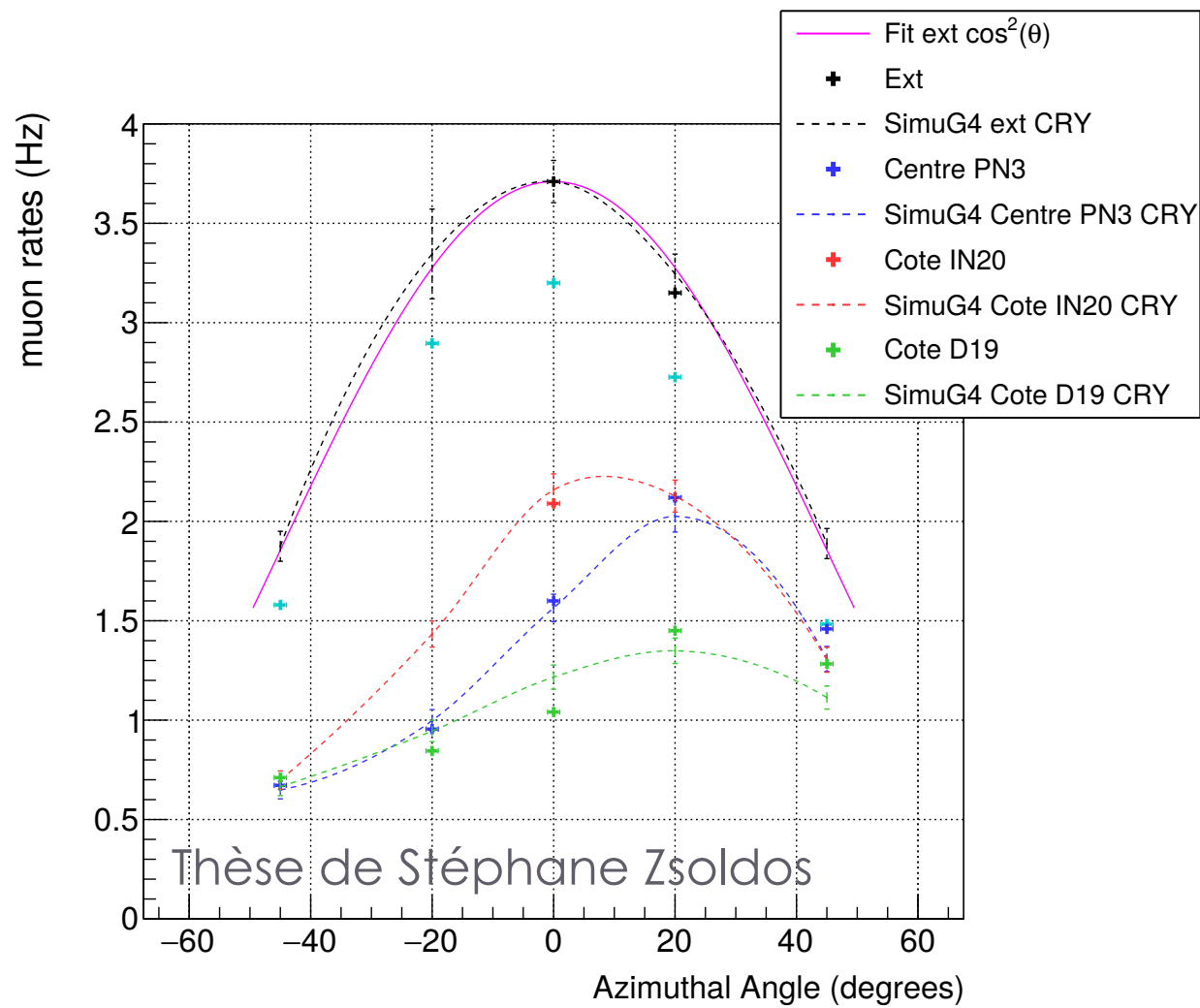
Cas de la recherche de paires corrélées



Cas de la recherche de paires accidentelles



➤ Bruit de fond d'origine cosmique



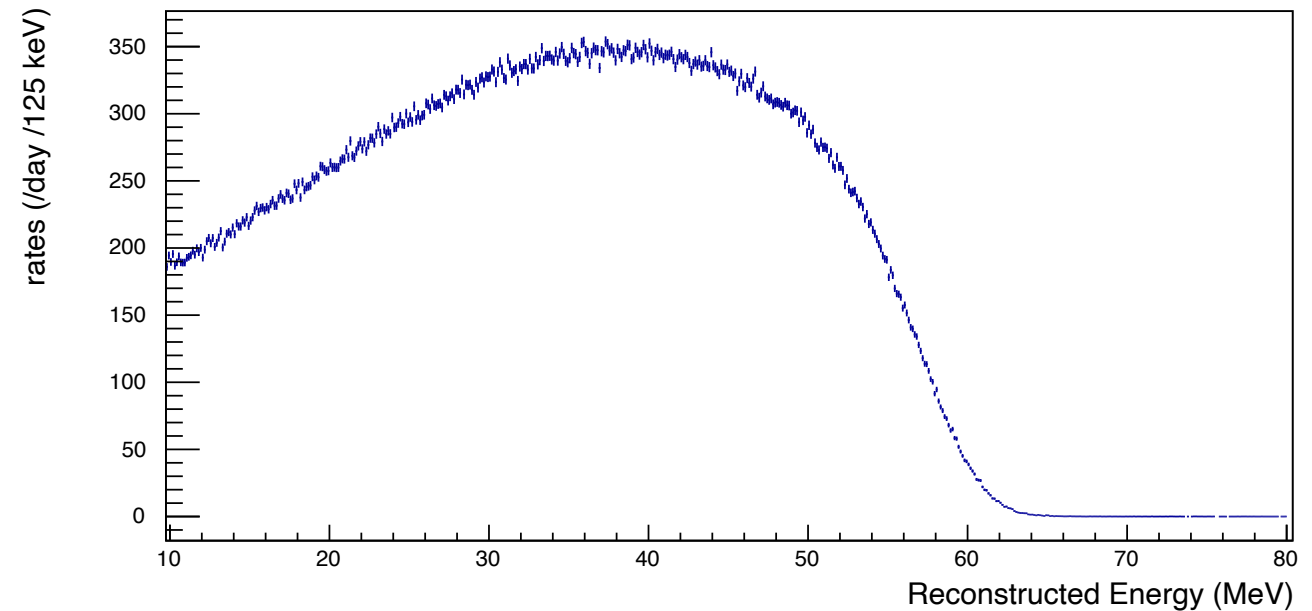
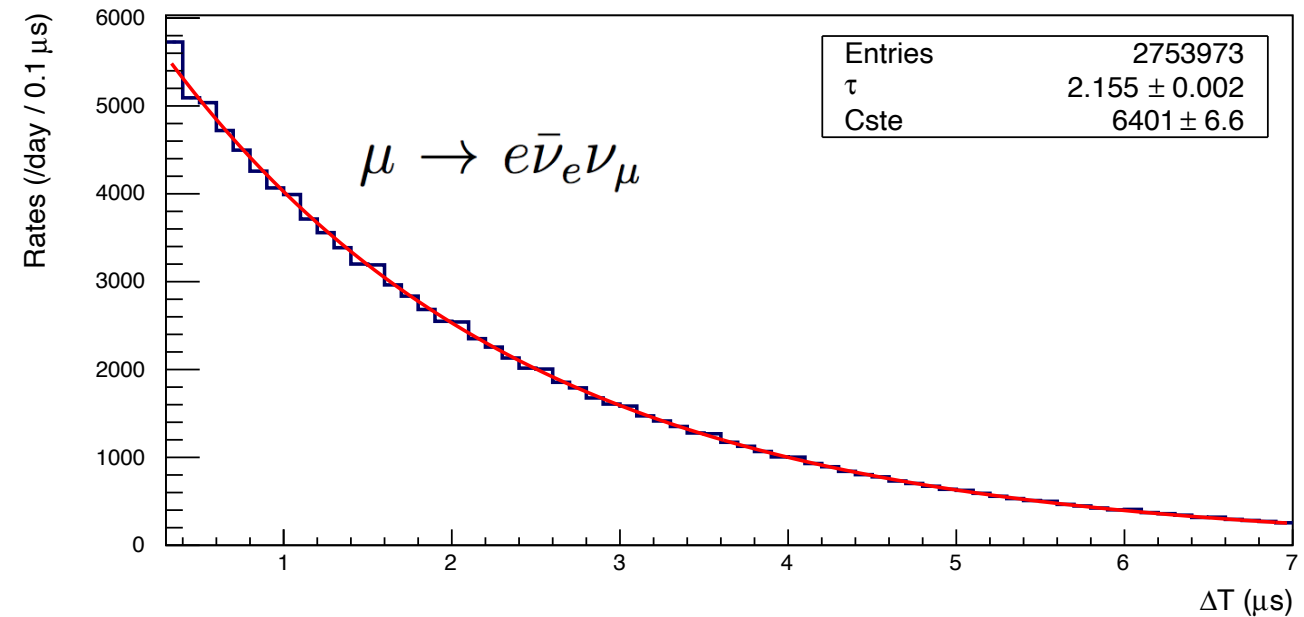
Désintégrations de muons dans STEREO

prompt = muon en fin de parcours
retardé = électron Michel

Identification basée sur une recherche paire

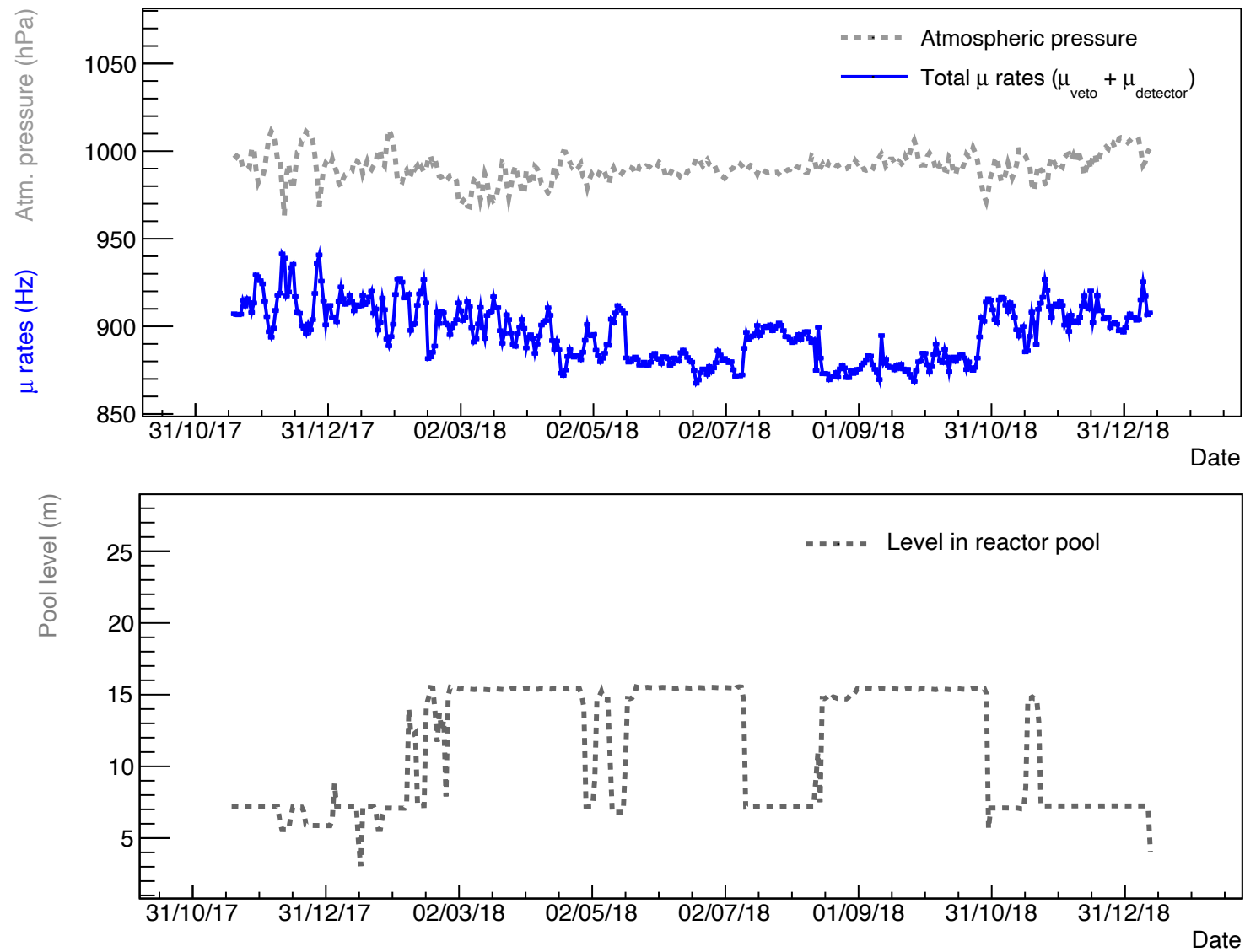
- E prompt et retardé = 100 MeV
- $\Delta T < 7 \mu\text{s}$

- 30 Hz identifiés en coïncidence avec le véto
- $E_{\text{max}} \sim m_{\mu} / 2$
- $\tau_{\mu} \sim 2.19 \mu\text{s}$



- Variations avec la **pression atmosphérique** et le **niveau d'eau** situé dans la piscine au dessus du réacteur

$$R(P_{atm}) = R^{ref} + f_{atm} \cdot (P_{atm} - P_{atm}^{ref})$$

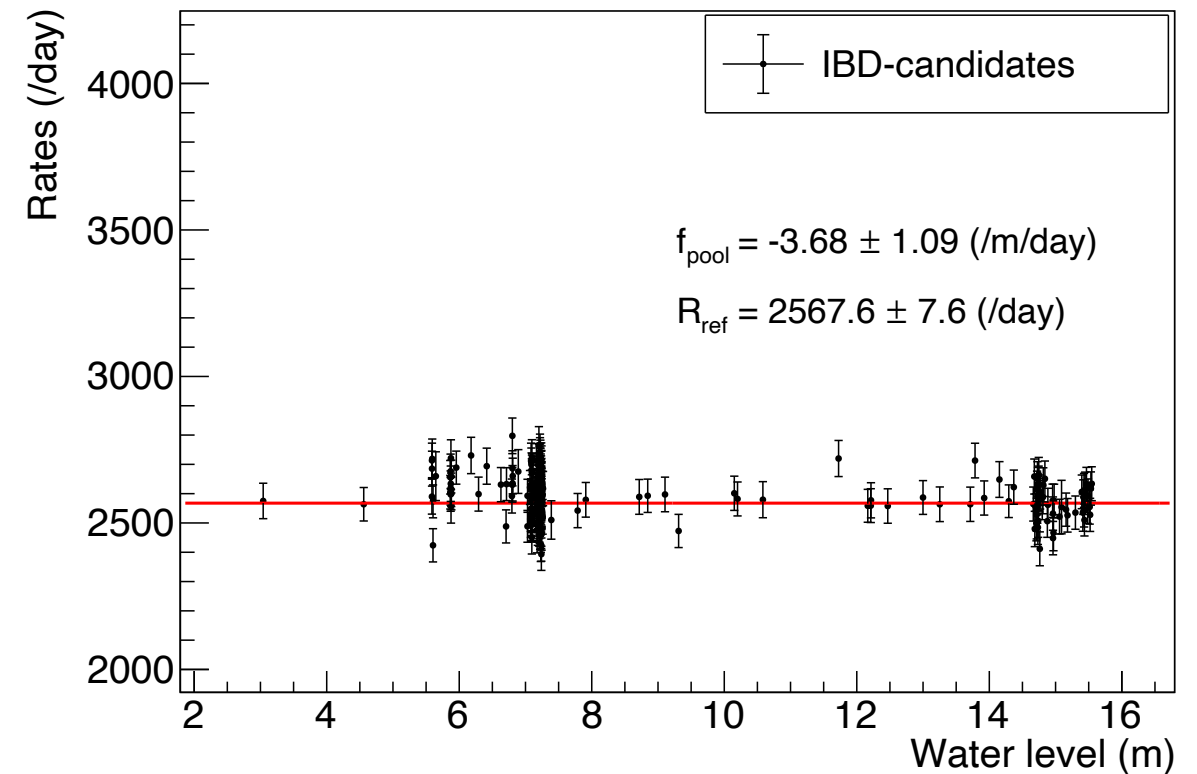
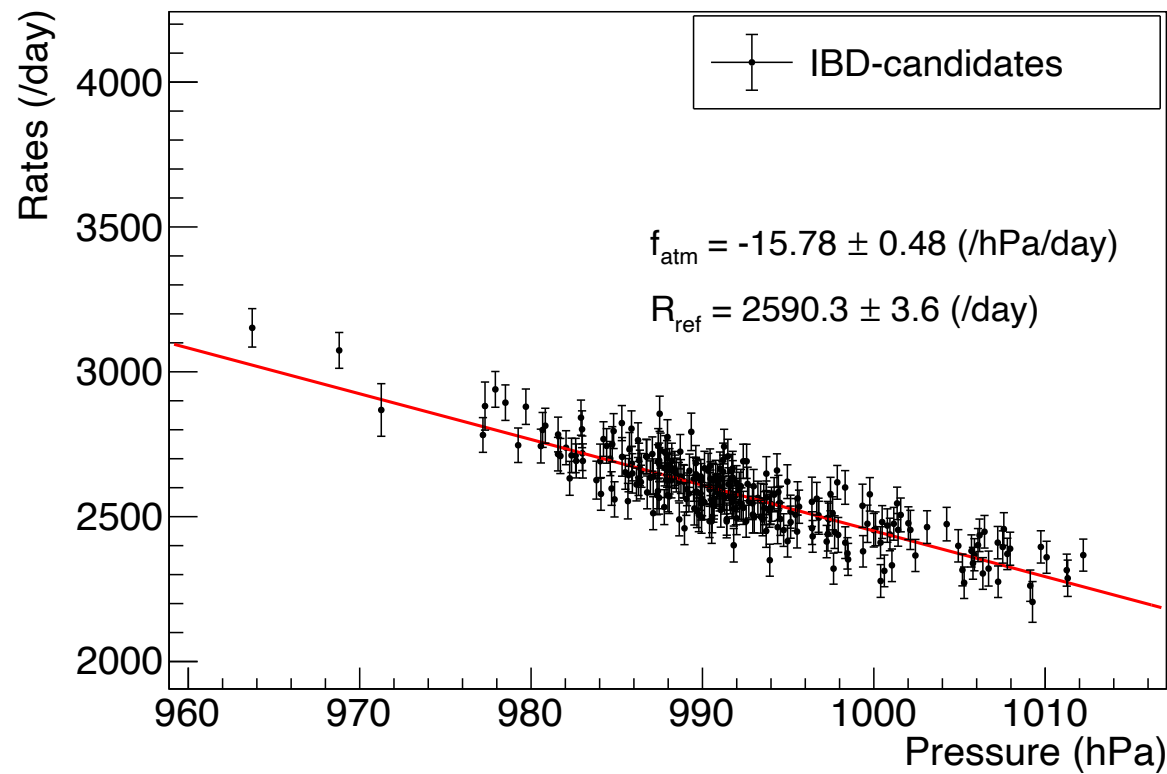


- Variations avec la **pression atmosphérique** et le **niveau d'eau** situé dans la piscine au dessus du réacteur

$$R(P_{atm}) = R^{ref} + f_{atm} \cdot (P_{atm} - P_{atm}^{ref})$$

$$f_{atm} = (-0.60 \pm 0.02)\% \text{ hPa}^{-1}$$

$$f_{pool} = (-0.14 \pm 0.02)\% \text{ m}^{-1}$$

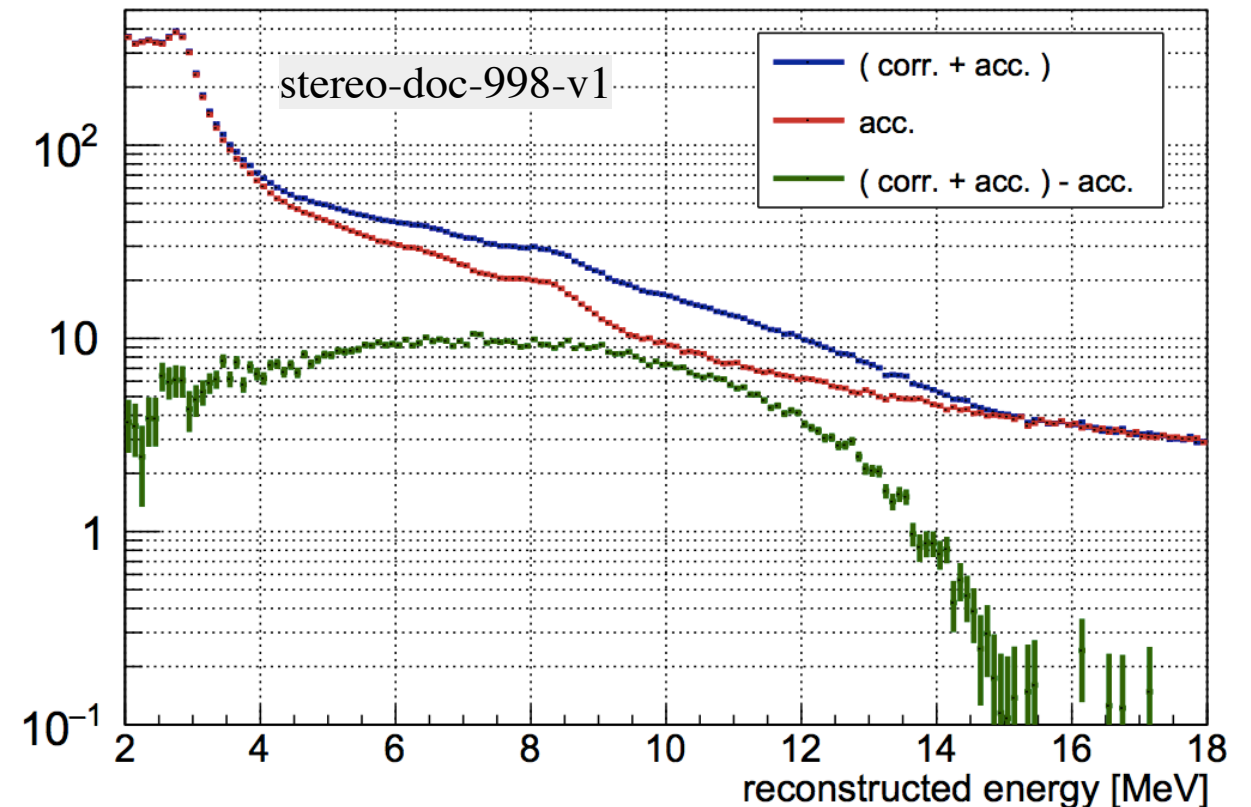
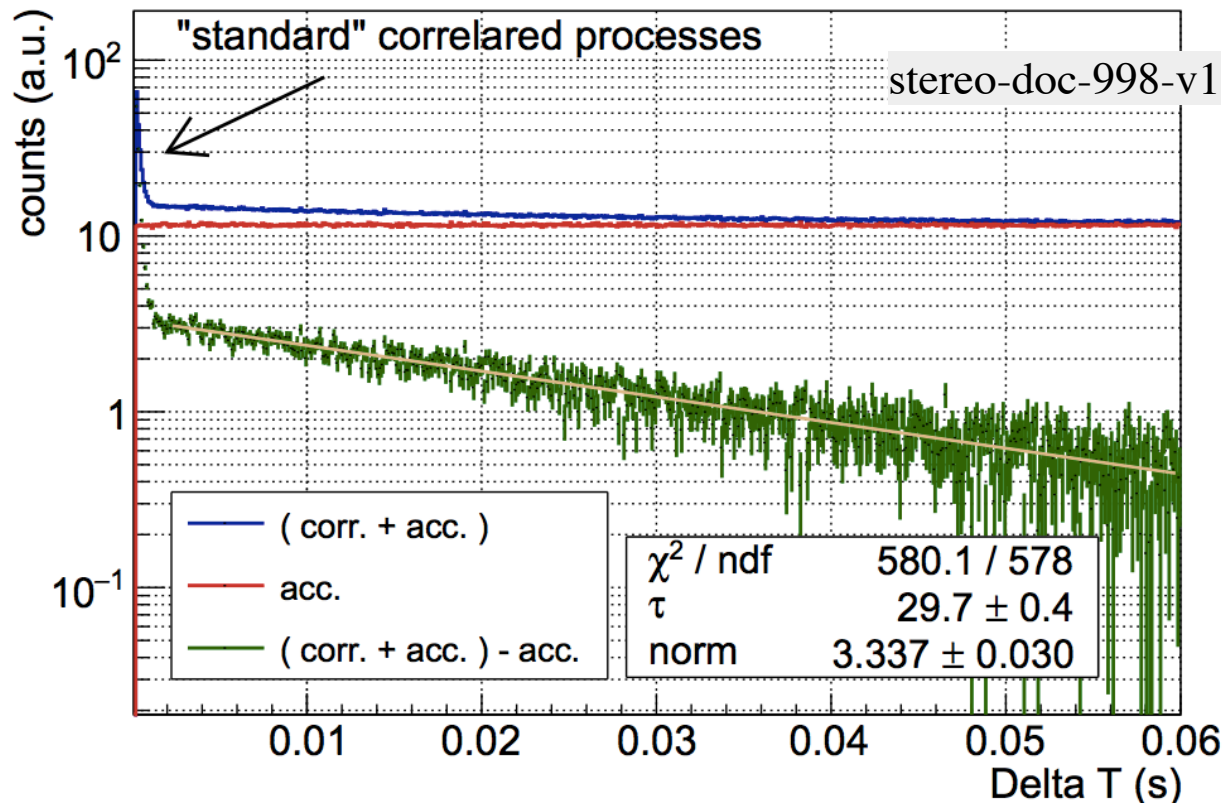


Bore12

- désintégration β^-
- [0-13.4] MeV
- $\tau = 29.7 \mu\text{s}$

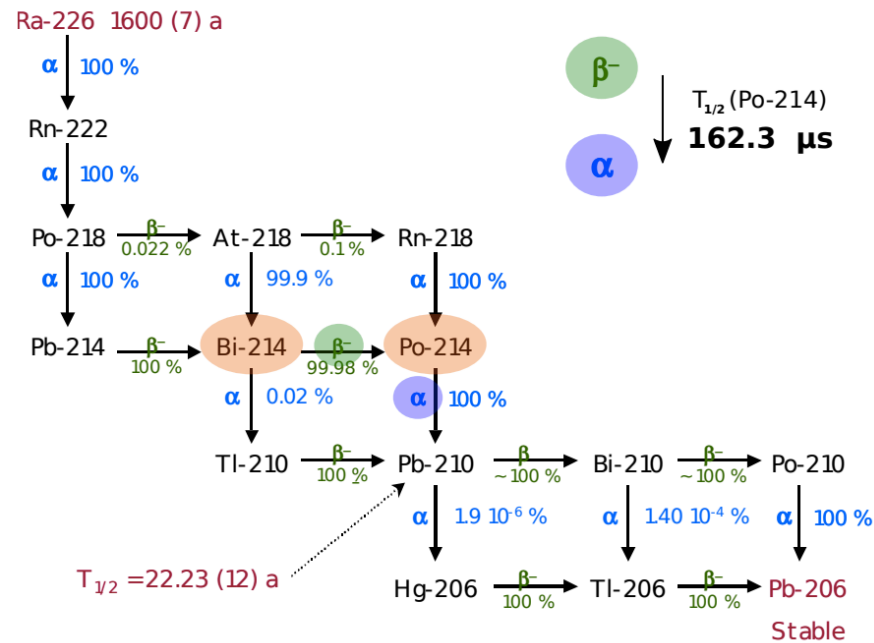
Deux possibilités pour créer un noyau de Bore :

- Capture du muon (basse E) $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B}$
processus dominant
prompt = muon, retardé = e-
- Réaction (n,p) (spallation de muons) $n + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + p$

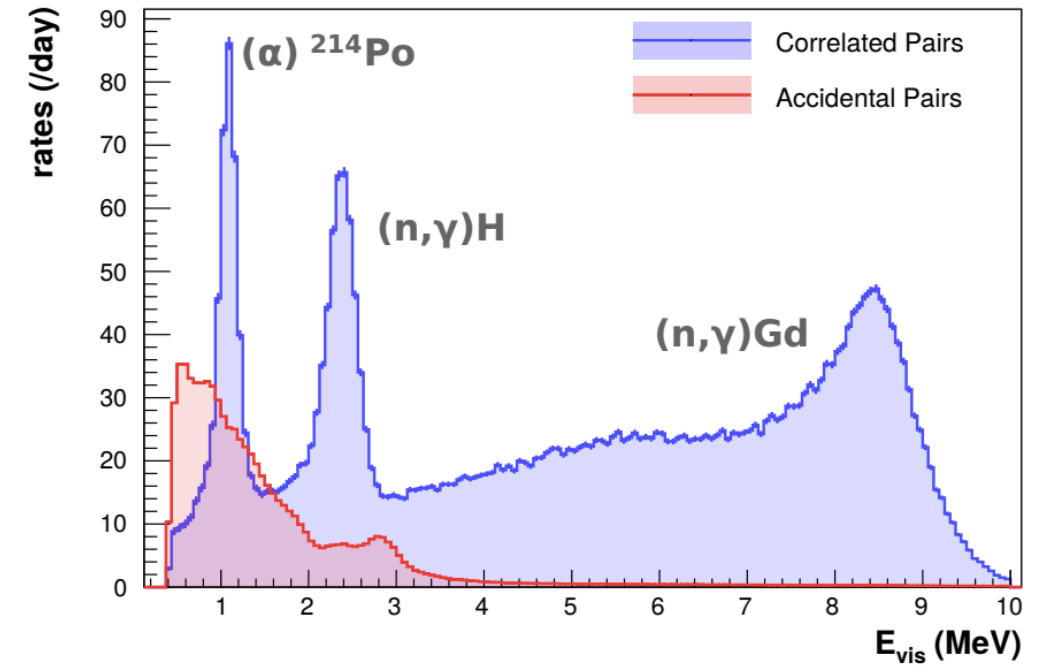


BACK-UP

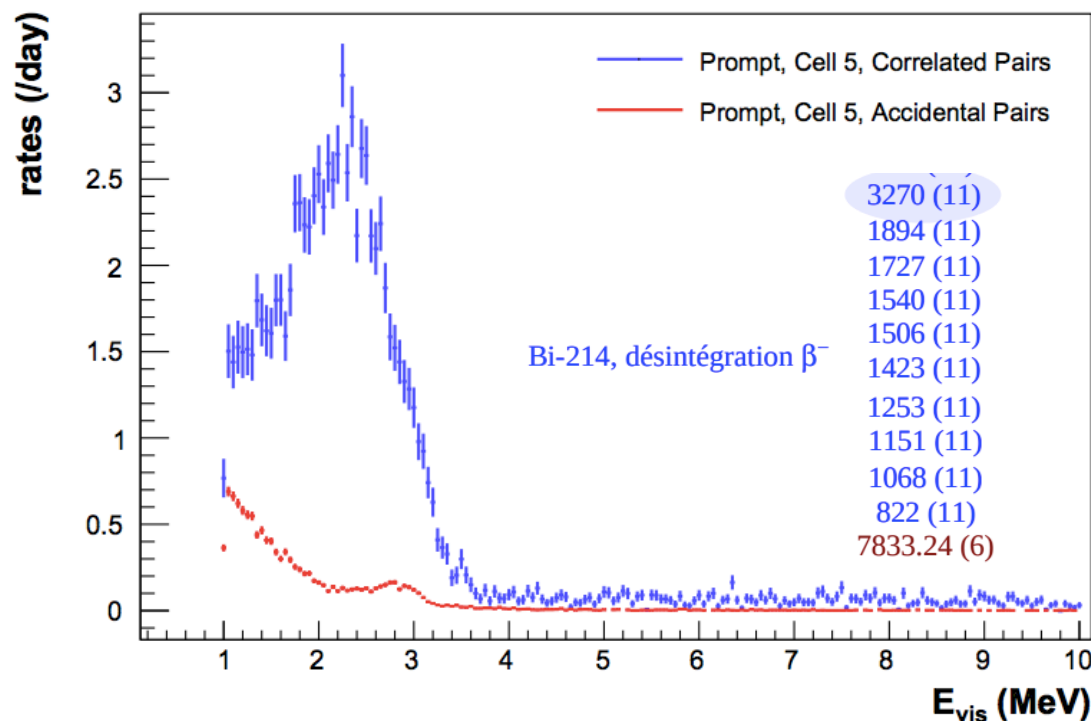
^{214}Bi - ^{214}Po : recherche de paires



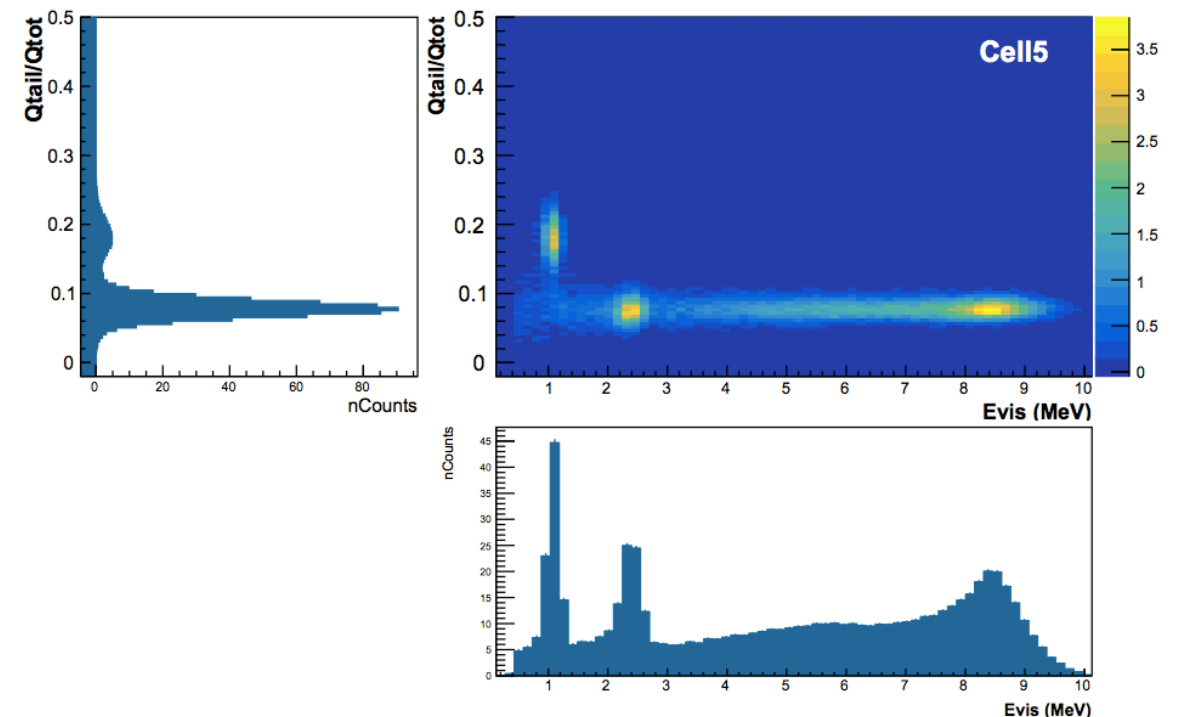
Spectre retardé : bruit habituel n-capt + alpha



Spectre prompt : beta- du Bismuth

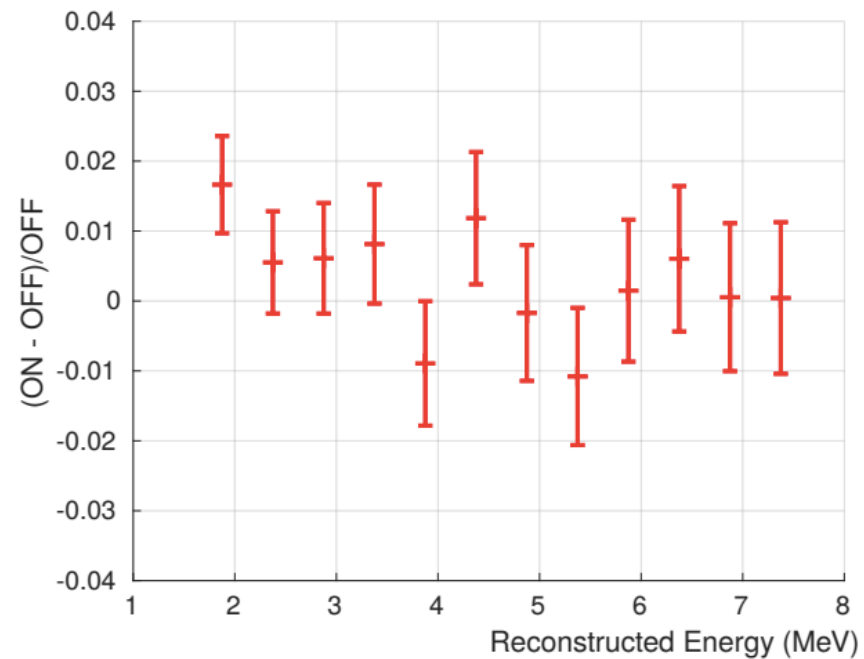
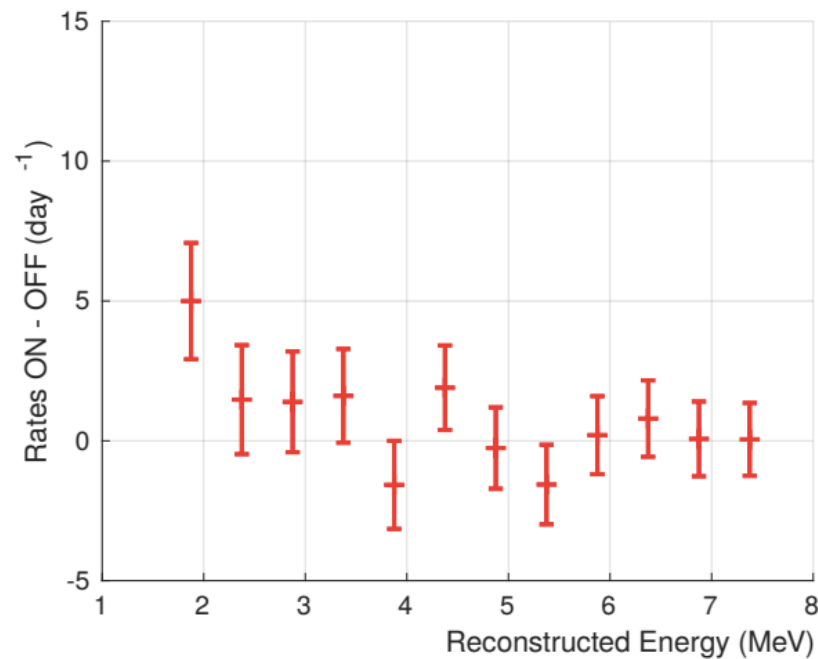


PSD retardé : recul d'alpha



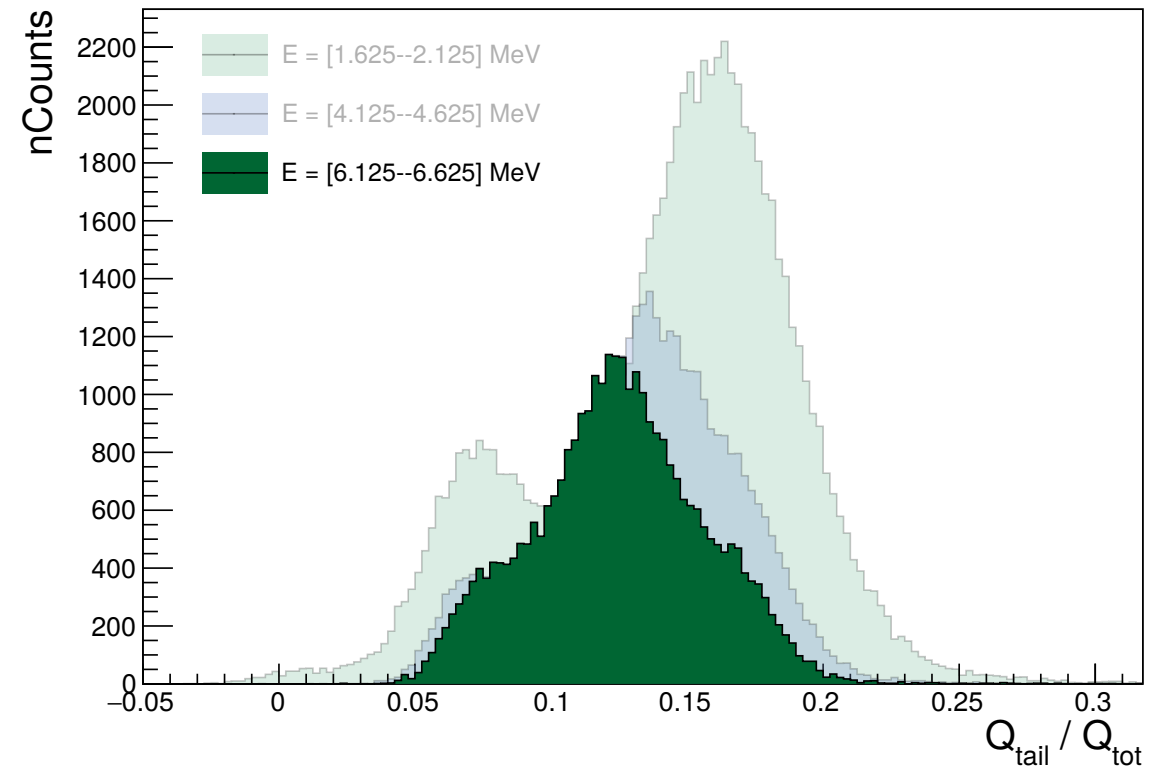
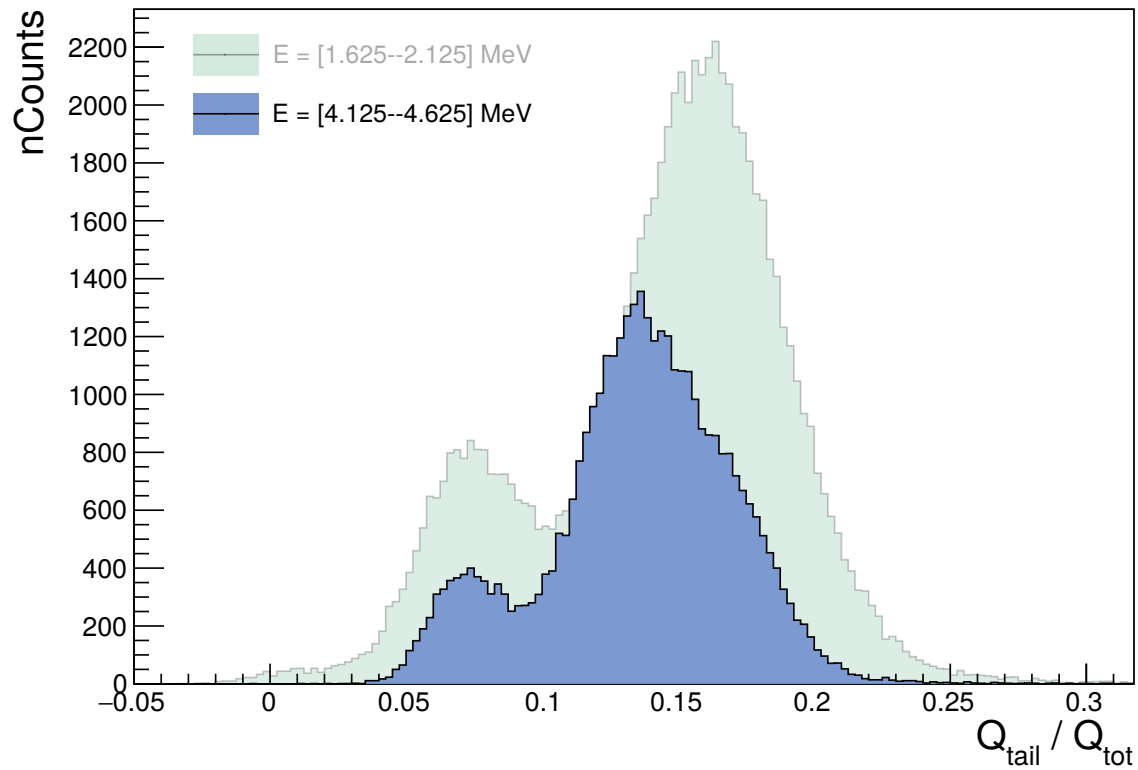
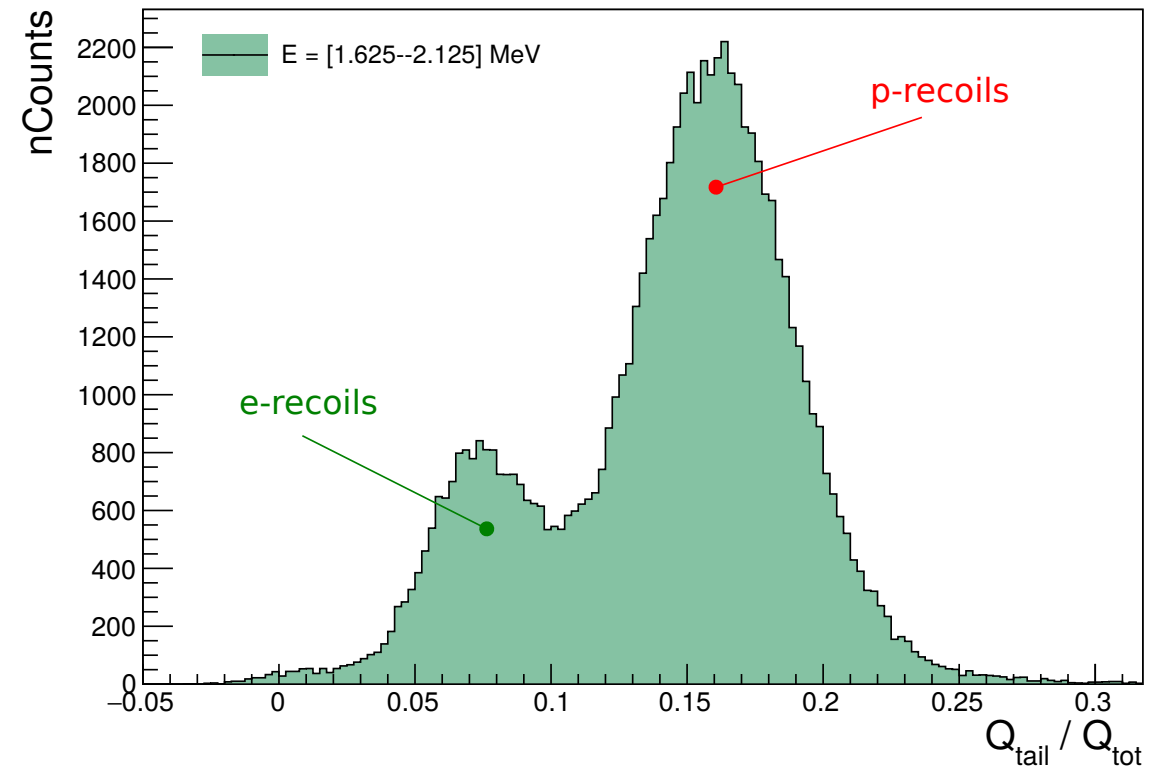
➤ **Bruit de fond corrélé induit par le réacteur**

- Indications d'un excès dans le premier intervalle d'énergie : $\frac{\Delta R_p^{\text{ON-OFF}}}{R_p^{\text{OFF}}} = (1.6 \pm 0.8)\%$
- Systématique sur le signal neutrino $\sim 2.7\%$

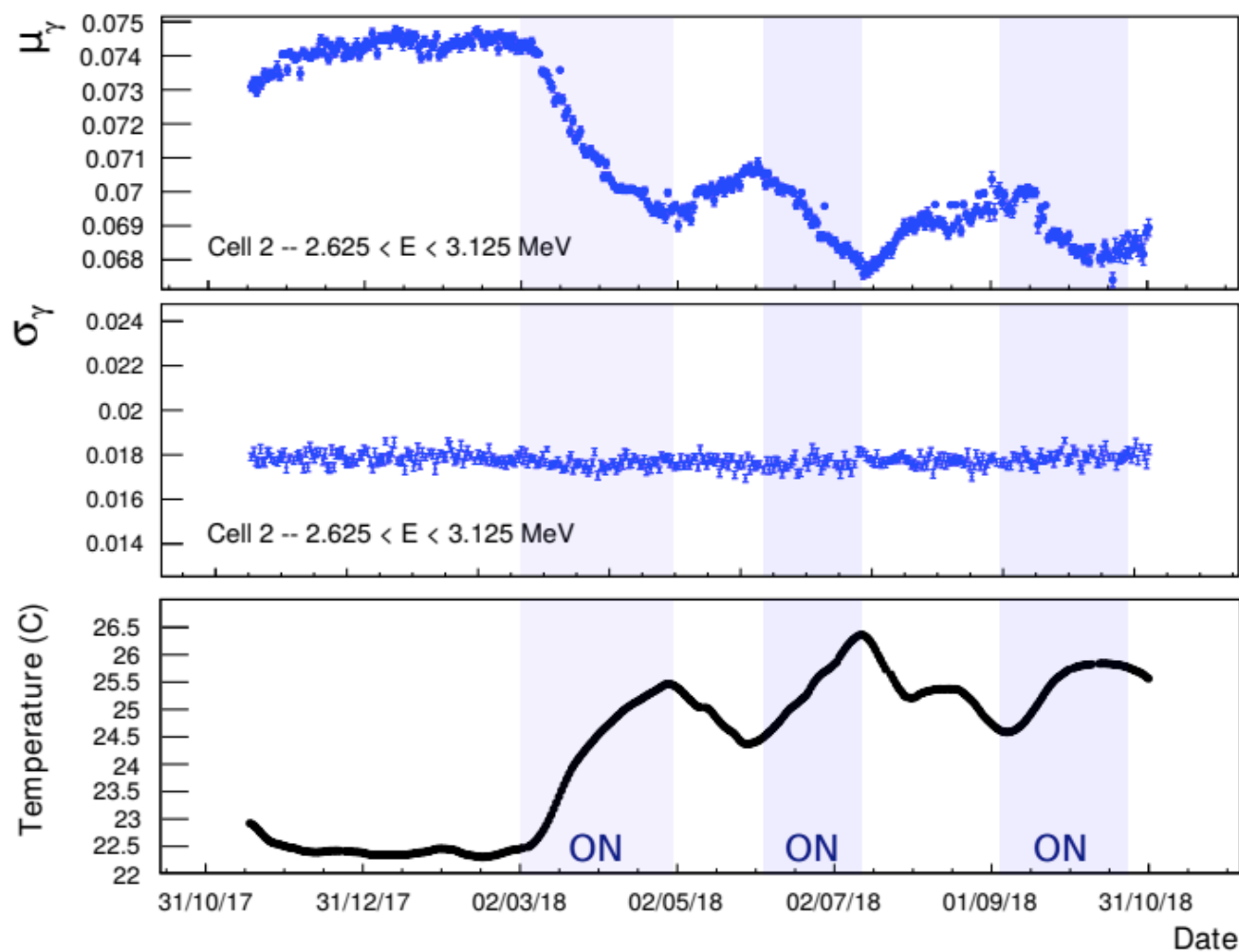


Pulse Shape Discrimination

➤ Évolution de la PSD avec l'énergie

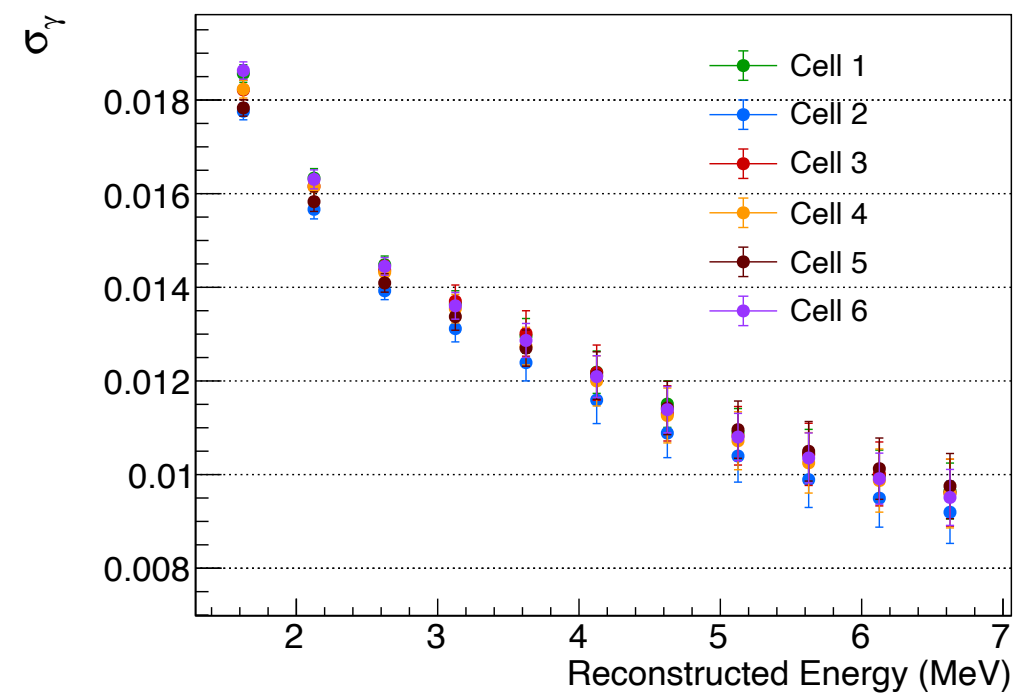
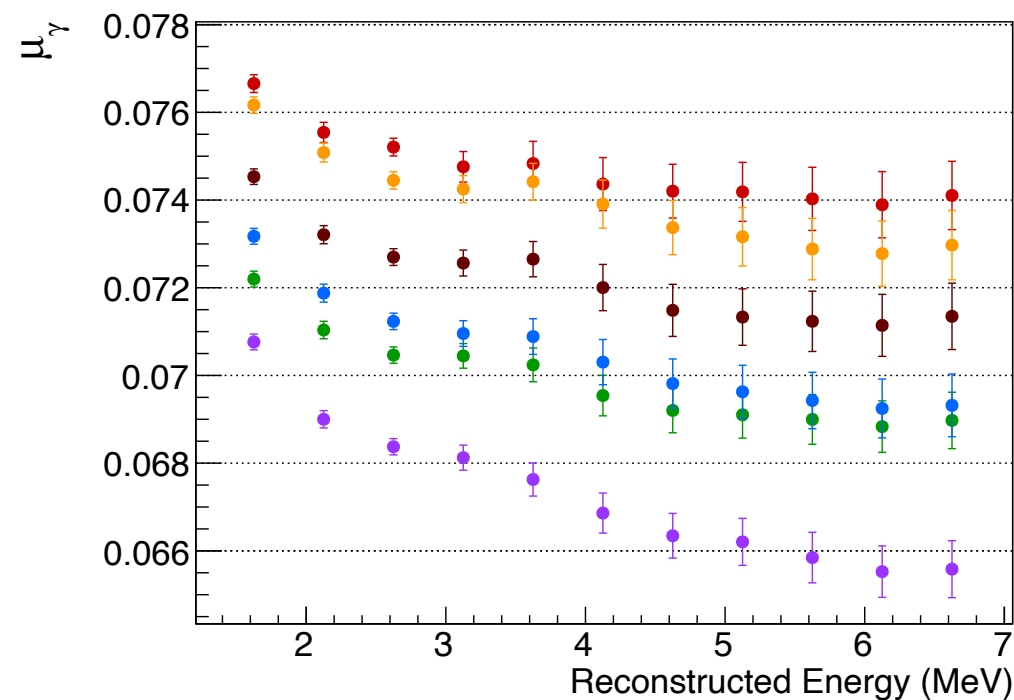


Évènements simples : PSD



Évolution de la position et largeur de la PSD

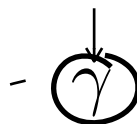
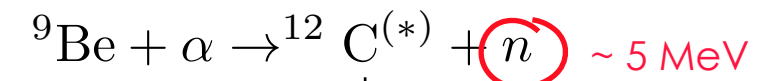
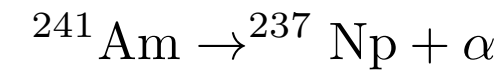
Position et largeur de la PSD {cell,E}



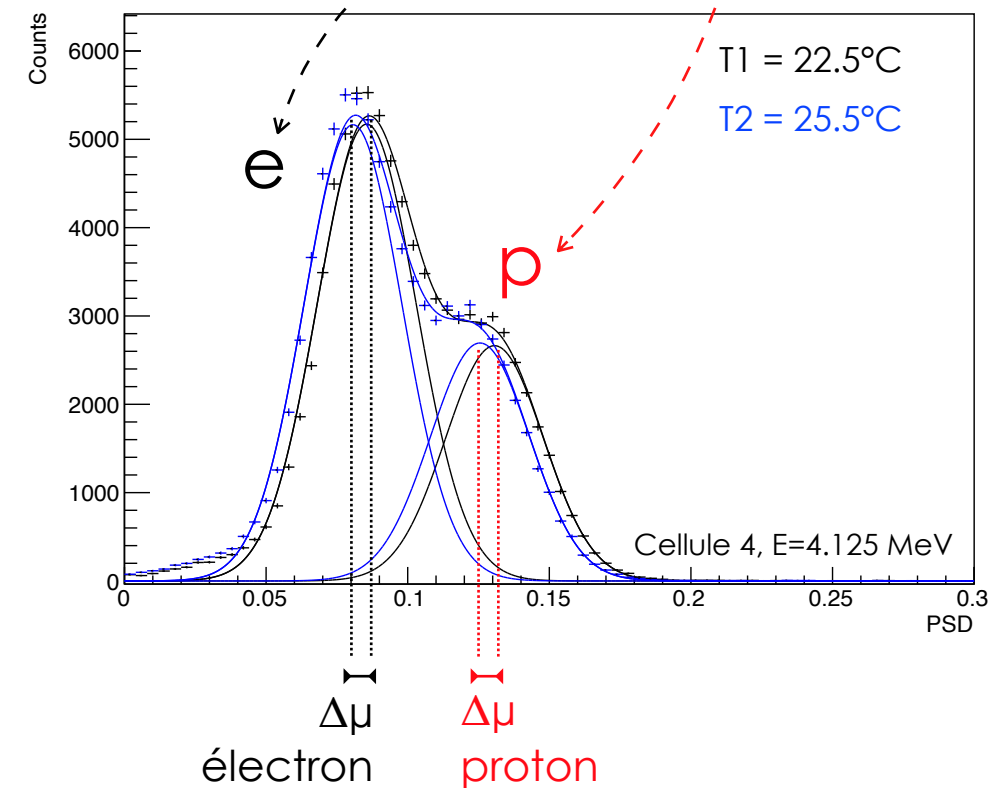
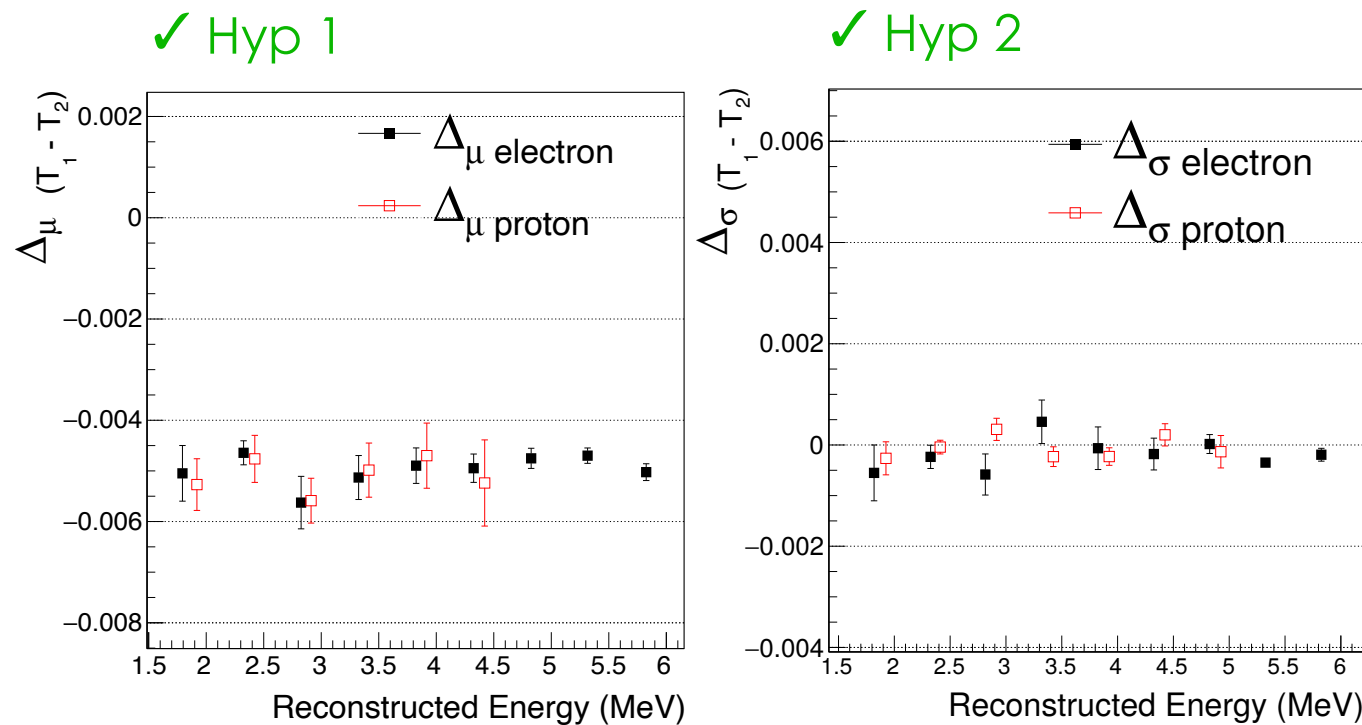
BACK-UP

- **Hyp 1** : Les effets de température et fuites ont le même impact sur les reculs-e et reculs-p
- **Hyp 2** : La largeur σ reste fixe

- Tests effectués avec une source radioactive d'Américium-Béryllium :



4.4 MeV



- Test aussi effectué en Phase-I
- Suivi mensuel des pics e/p (AmBe)
- Suivi hebdomadaire (⁵⁴Mn)
- Suivi journalier évènements simples



Extraction des neutrinos

Test de vraisemblance

- Maximisation de vraisemblance \mathcal{L} entre les taux mesurés n et les taux attendus $\nu(\theta)$ **dans chaque bin de PSD i**

$$\mathcal{L} = \prod_{i=0}^{\text{N PSD bin}} \mathcal{P}(n_i; \nu_i(\theta)) = \prod_{i=0}^{\text{N PSD bin}} \frac{\nu_i(\theta)^{n_i} e^{-\nu_i(\theta)}}{n_i!}$$

$$\begin{aligned} -\ln \lambda(\theta) = \sum_{i=0}^{\text{N PSD bin}} & \left(M_{\text{ON}_i} - \text{ON}_i + \text{ON}_i \ln \frac{\text{ON}_i}{M_{\text{ON}_i}} \right. \\ & + M_{\text{OFF}_i} - \text{OFF}_i + \text{OFF}_i \ln \frac{\text{OFF}_i}{M_{\text{OFF}_i}} \\ & + M_{\text{ON}_i^{\text{Acc}}} - \text{ON}_i^{\text{Acc}} + \text{ON}_i^{\text{Acc}} \ln \frac{\text{ON}_i^{\text{Acc}}}{M_{\text{ON}_i^{\text{Acc}}}} \\ & \left. + M_{\text{OFF}_i^{\text{Acc}}} - \text{OFF}_i^{\text{Acc}} + \text{OFF}_i^{\text{Acc}} \ln \frac{\text{OFF}_i^{\text{Acc}}}{M_{\text{OFF}_i^{\text{Acc}}}} \right) \end{aligned}$$

où ON_i , OFF_i , ON_i^{Acc} et $\text{OFF}_i^{\text{Acc}}$ représentent les taux de comptage mesurés dans un intervalle de PSD i , et les modèles associés sont décrits par :

$$\begin{aligned} M_{\text{ON}_i} &= \mathbf{a} \, b_i^{\text{Corr}} + c_i^{\text{Acc,On}} f_{\text{Acc}}^{\text{On}} + \mathcal{G}_\nu(i; A, \mu, \sigma) \\ M_{\text{OFF}_i} &= b_i^{\text{Corr}} + c_i^{\text{Acc,Off}} f_{\text{Acc}}^{\text{Off}} \\ M_{\text{ON}_i^{\text{Acc}}} &= c_i^{\text{Acc,On}} \\ M_{\text{OFF}_i^{\text{Acc}}} &= c_i^{\text{Acc,Off}} \end{aligned}$$

Monte-Carlo

- Répétition de la procédure d'extraction réelle
- Modèle parfait du ON

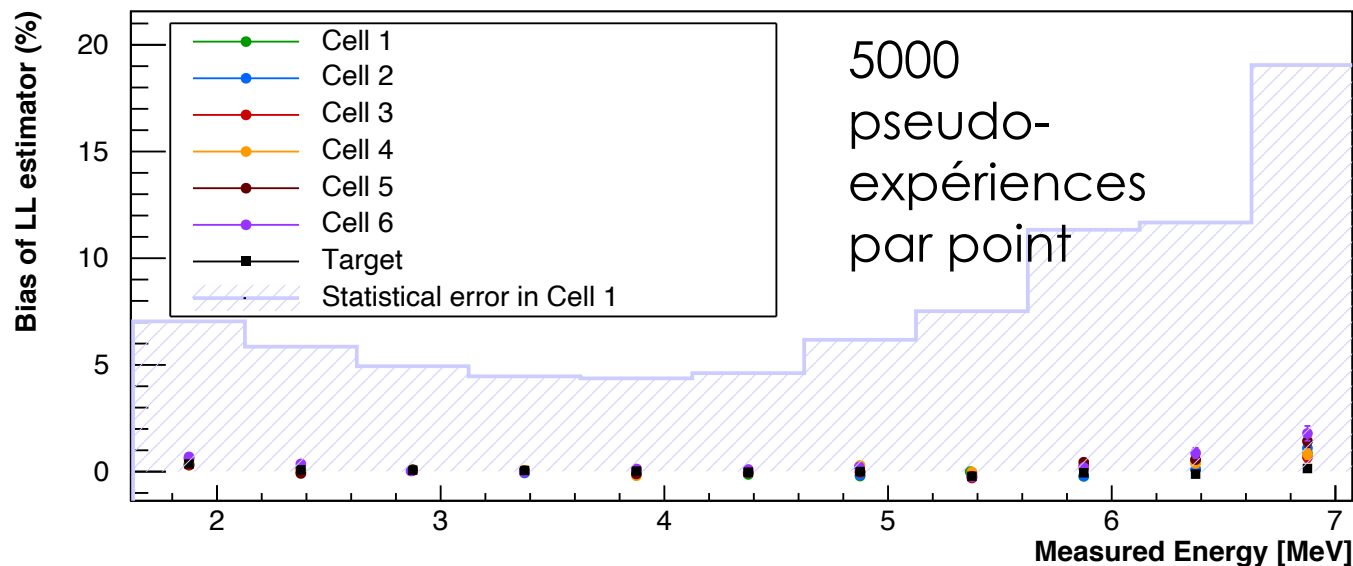
$$\text{ON} = \mathbf{a} \times (\text{OFF} - \text{OFF}^{\text{Acc}}) + \mathcal{G}(\mathcal{A}, \mu, \sigma) + \text{ON}^{\text{Acc}}$$

Distributions expérimentales (propres à cellule & énergie)
- N neutrinos simulés dans l'incertitude statistique

Biais de l'ajustement

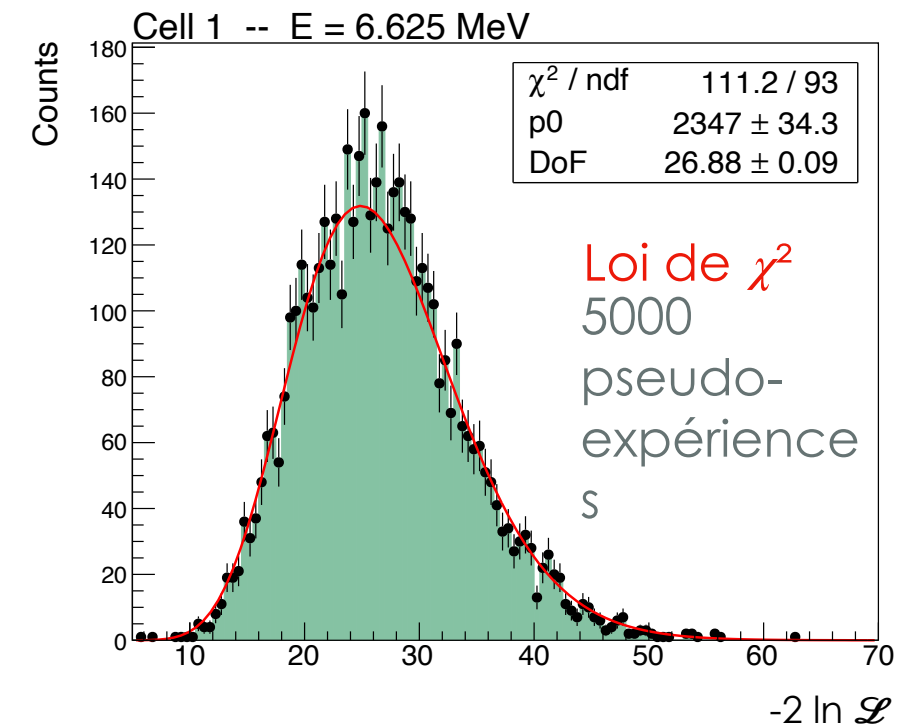
$$b_{\nu}^{\text{ajustement}} = \frac{N_{\nu}^{\text{ajusté}} - N_{\nu}^{\text{généré}}}{N_{\nu}^{\text{généré}}}$$

- ✓ Biais < Erreur statistique (~5%)

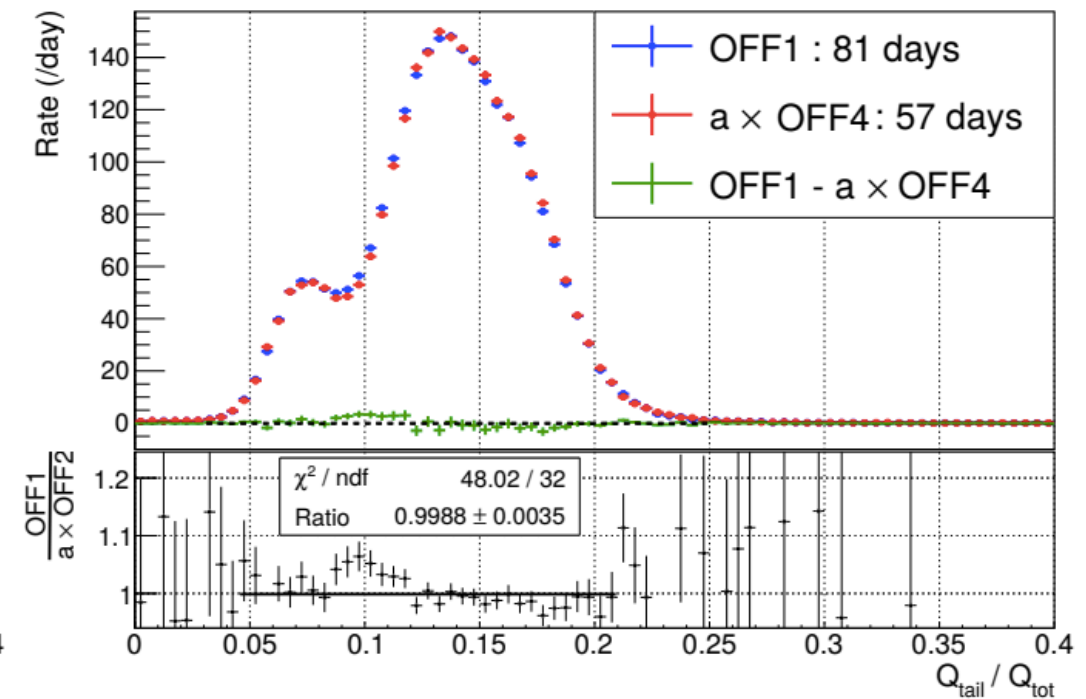
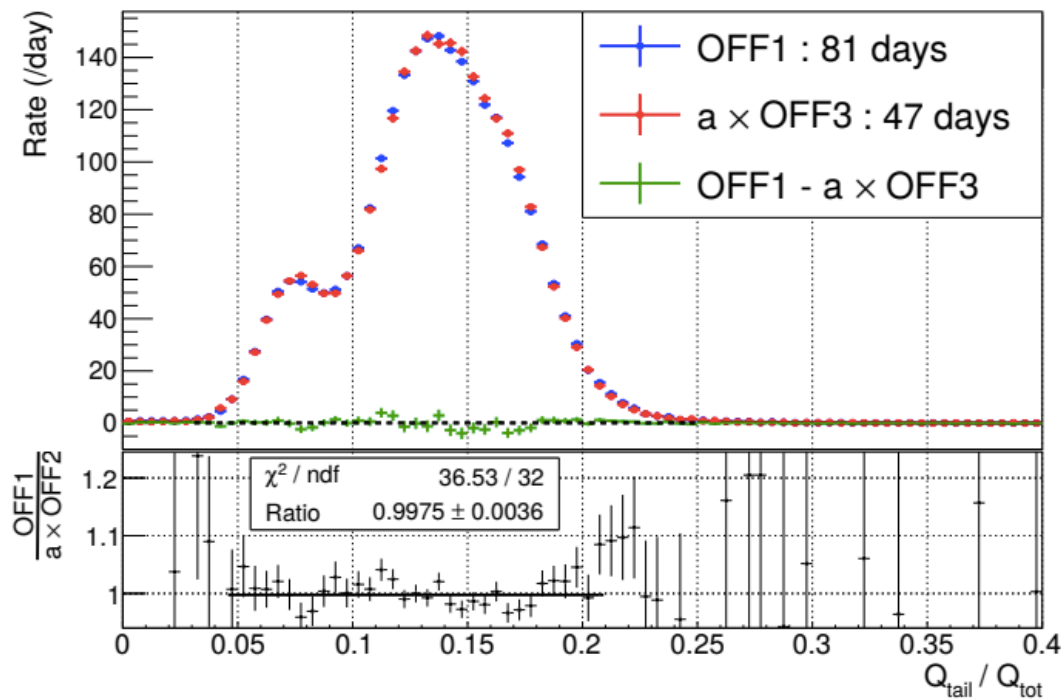
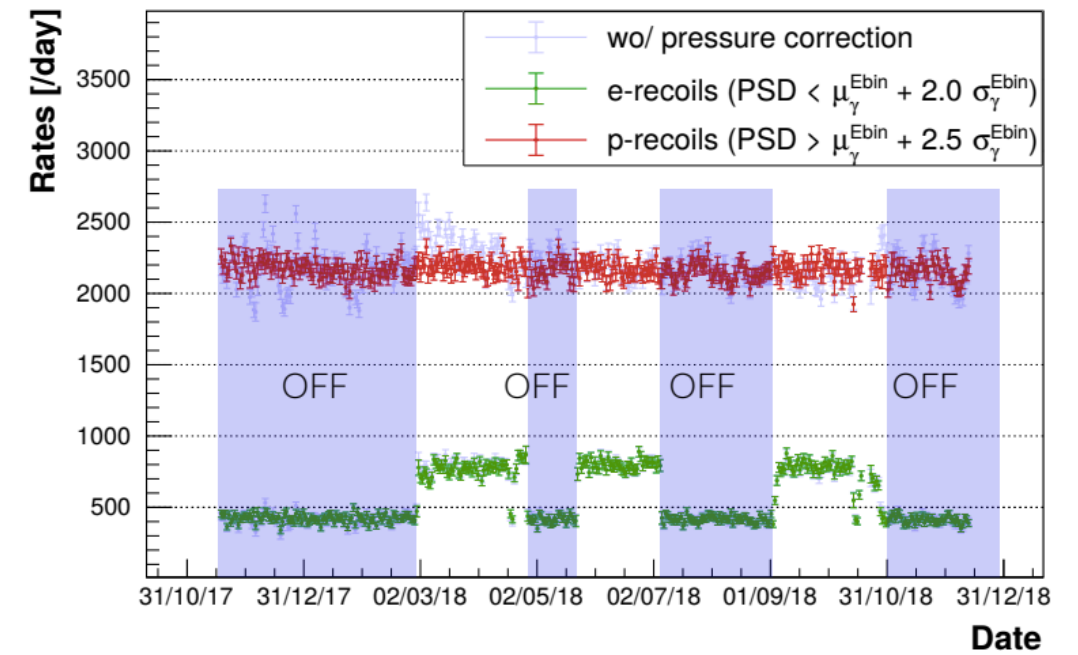


Caractère asymptotique

- ✓ L'accord données modèle suit une loi de χ^2 à n d.o.f.



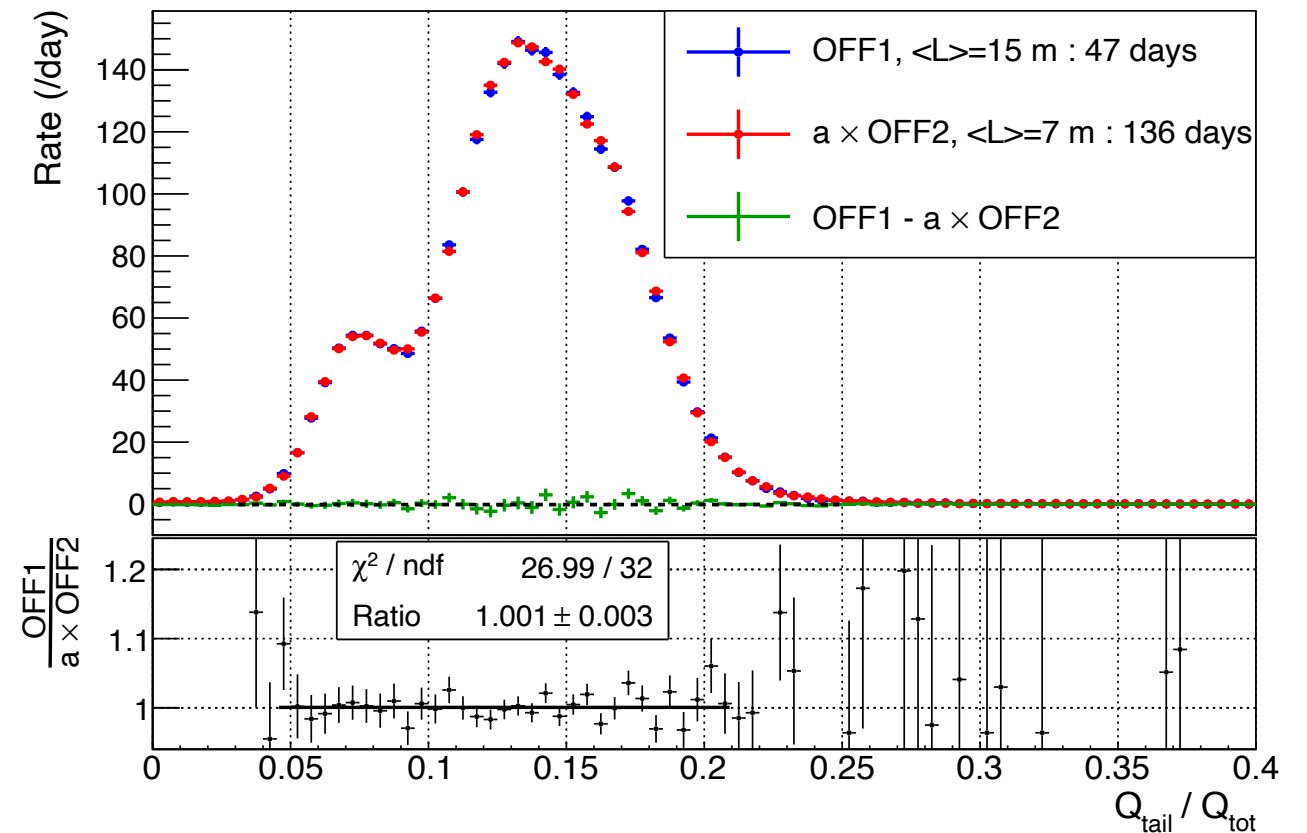
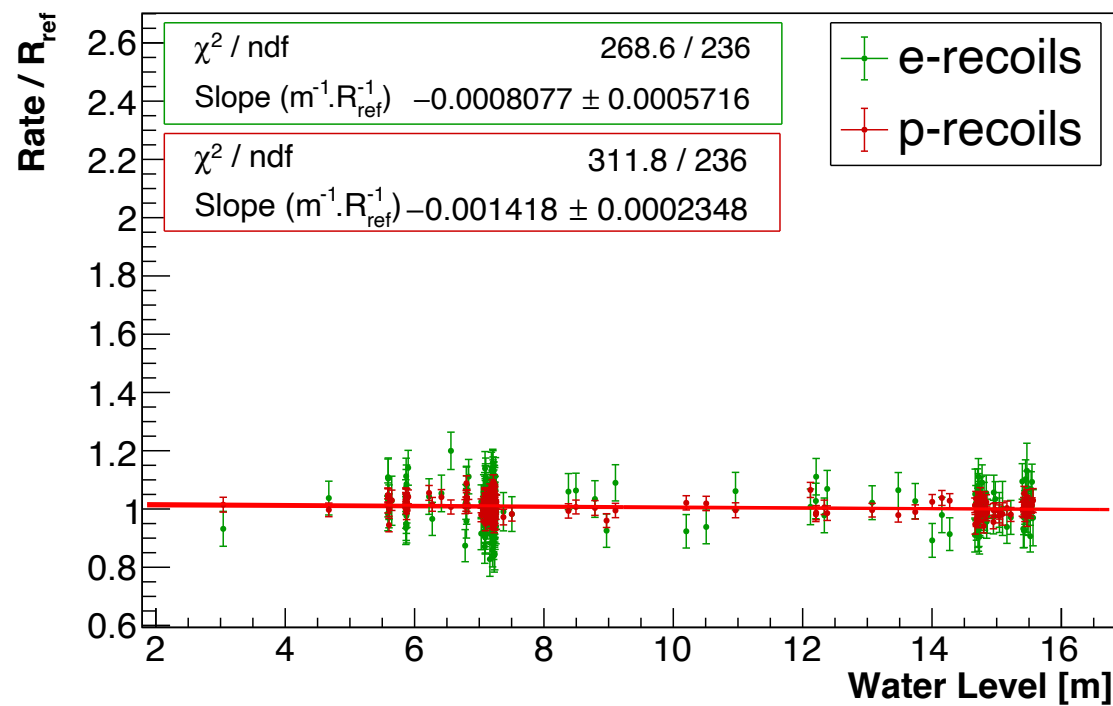
- **Stabilité de la forme de la PSD entre deux périodes de OFF**



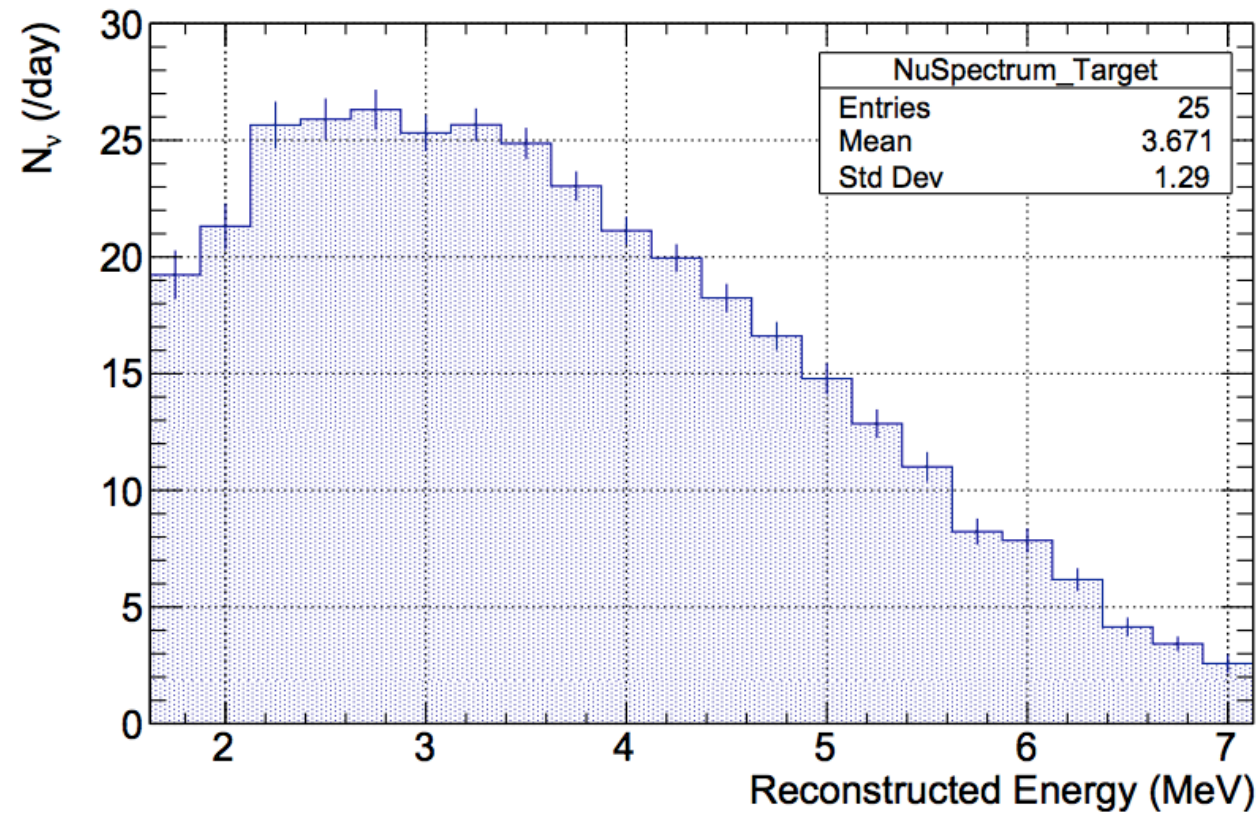
► **Stabilité de la forme de la PSD : effet du niveau d'eau dans la piscine réacteur**

$$\text{PSD}_{\text{recul-e}} < \mu_{\gamma}^{l,i} + 2.0 \sigma_{\gamma}^{l,i}$$

$$\text{PSD}_{\text{recul-p}} > \mu_{\gamma}^{l,i} + 2.5 \sigma_{\gamma}^{l,i}$$

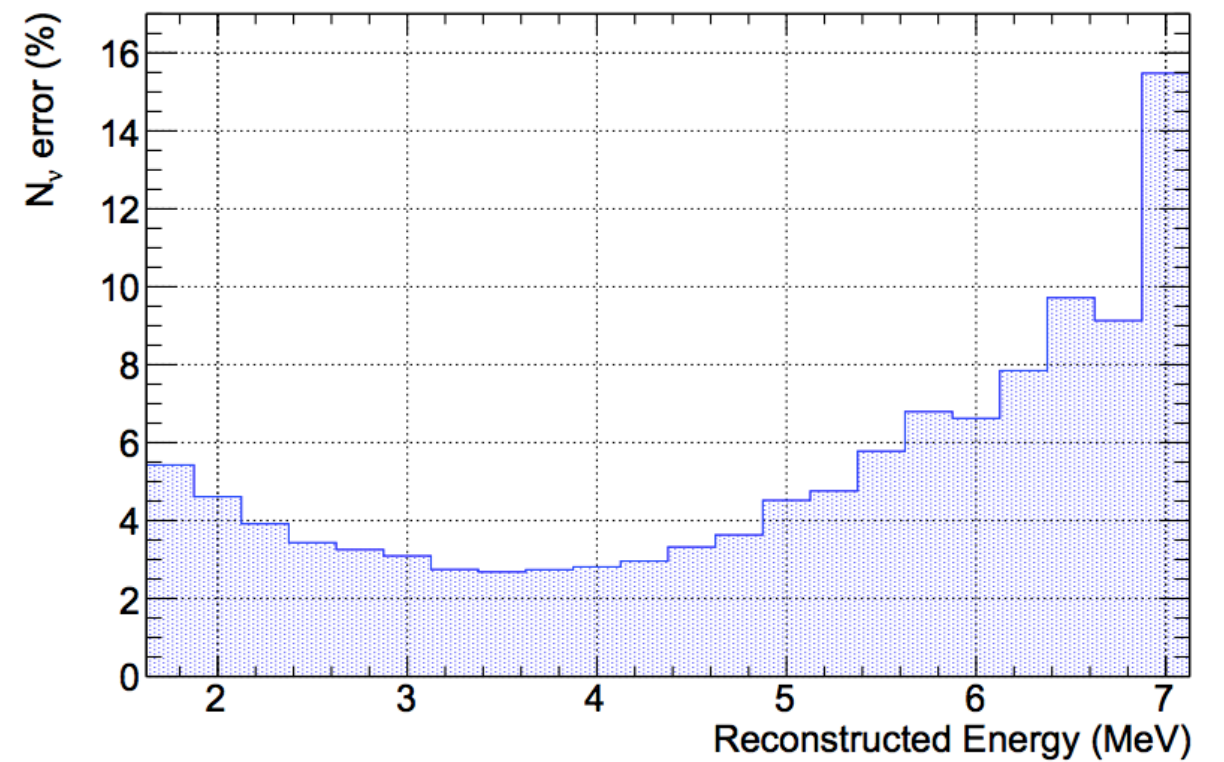


► **Validation** par deux méthodes indépendantes que la **forme du bruit est stable** sous variation du niveau d'eau

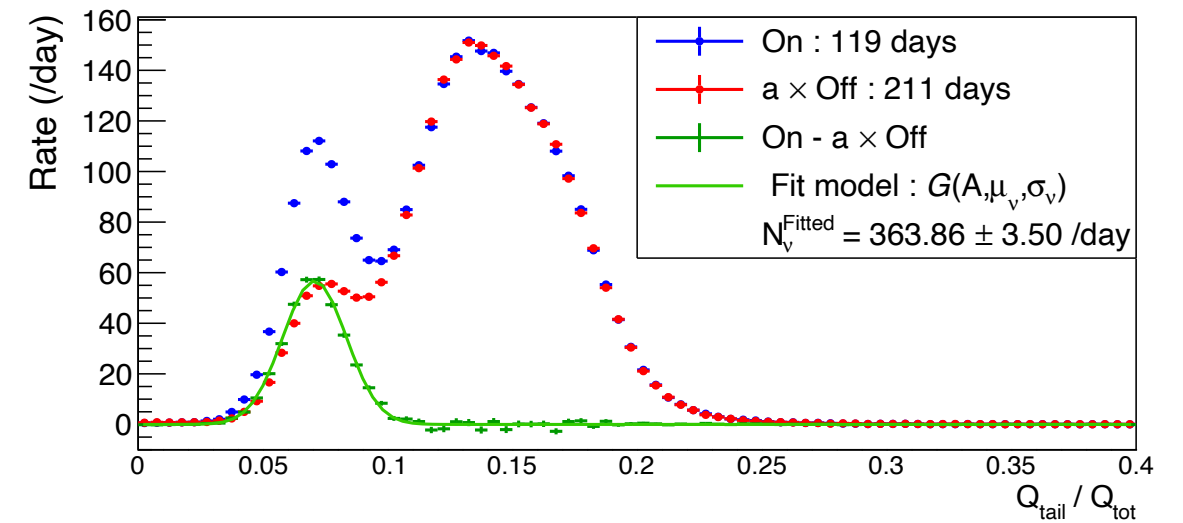
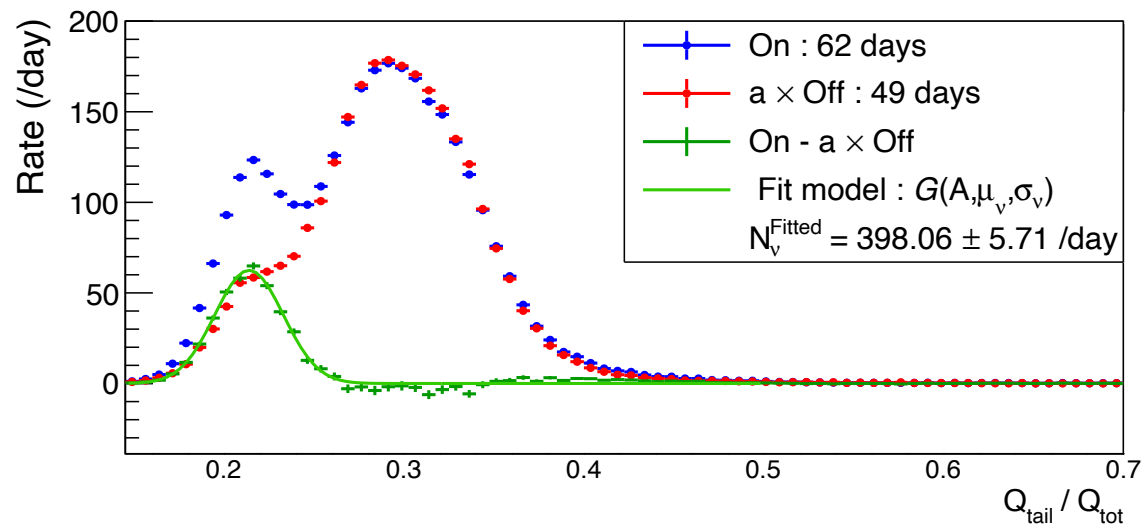
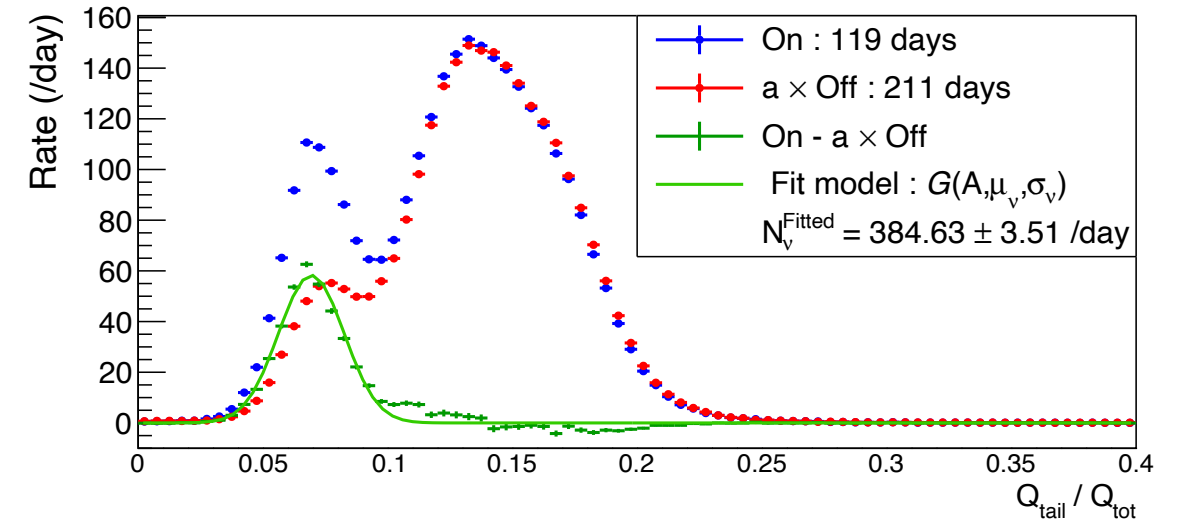
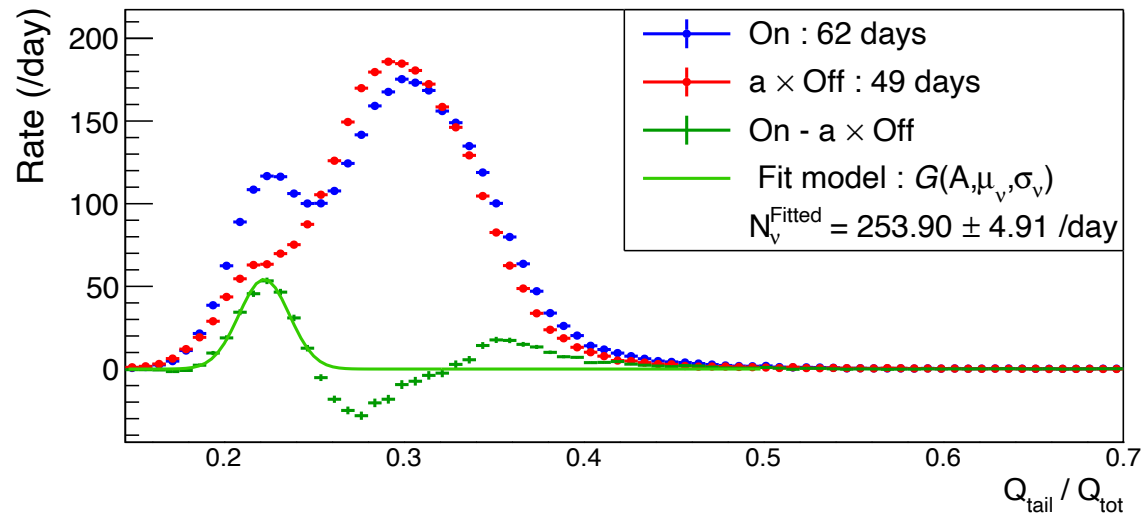


► Spectre sommé

Incertitude statistique inférée par l'ajustement



➤ Impact de la correction de l'observable PSD



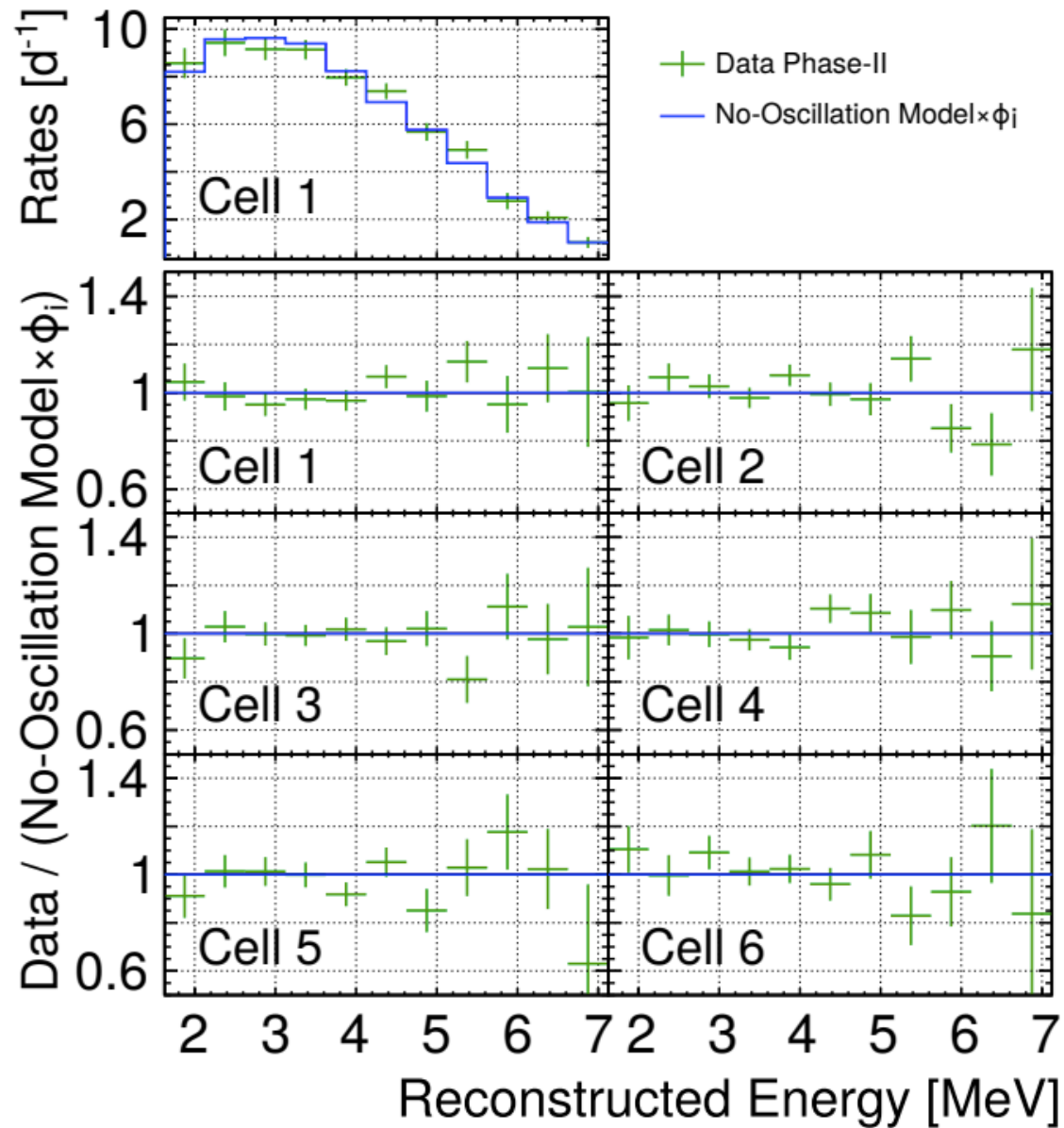
➤ Phase-I

➤ Phase-II

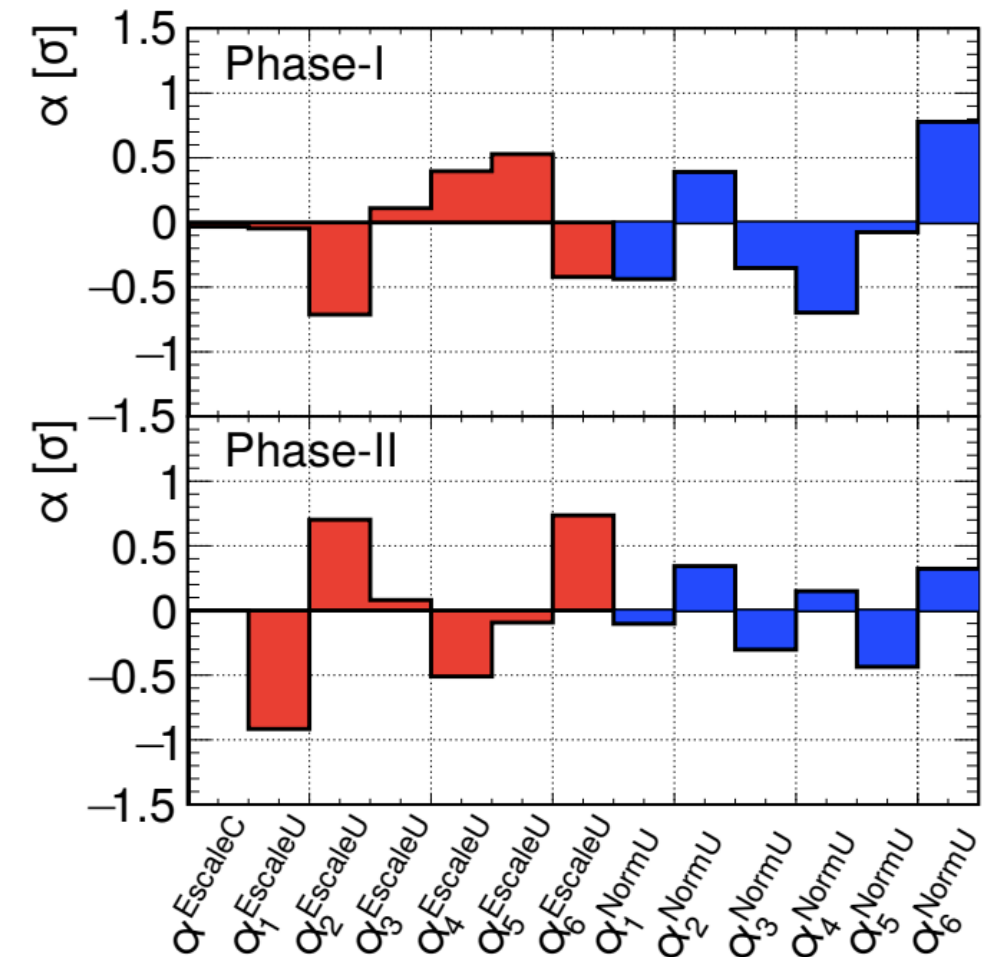
Analyses statistiques

Test de l'hypothèse de non-oscillation

- Très bon accord entre les données et le modèle sans oscillation * Φ_i



- Termes de contraintes compris dans les +/- 1%

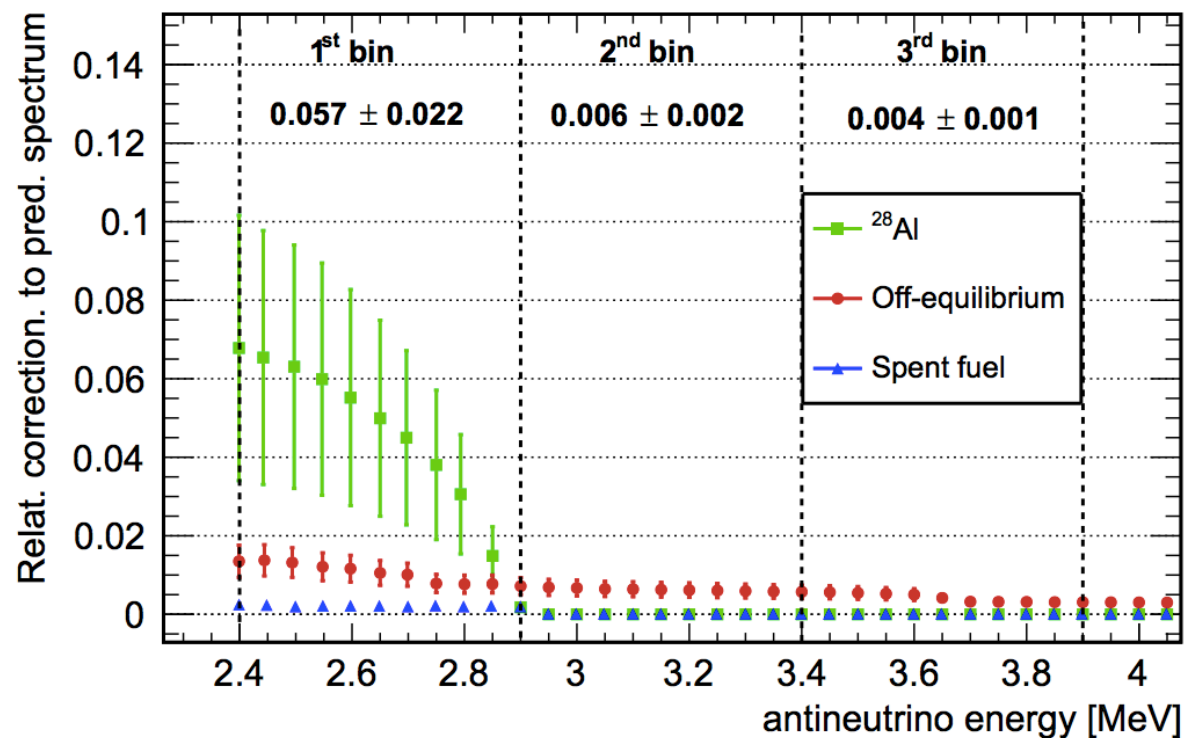


- L'hypothèse de non-oscillation n'est pas rejetée

Prédiction (Huber U^{235})

- Connaissance précise des spectres β provenant des désintégrations des produits de fission
- Spectres β mesurés à l'ILL ~1980 (Schreckenbach et al.) pour : ^{235}U , ^{239}Pu et ^{241}Pu

Corrections à la prédiction



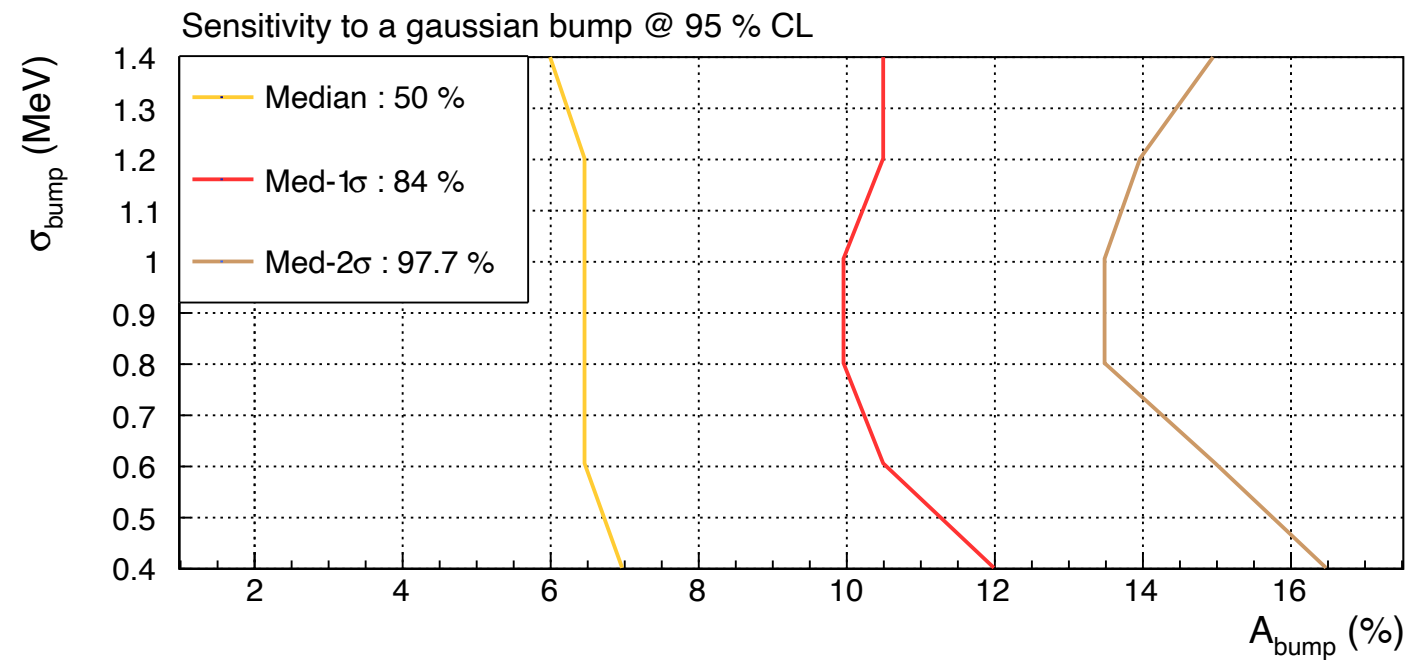
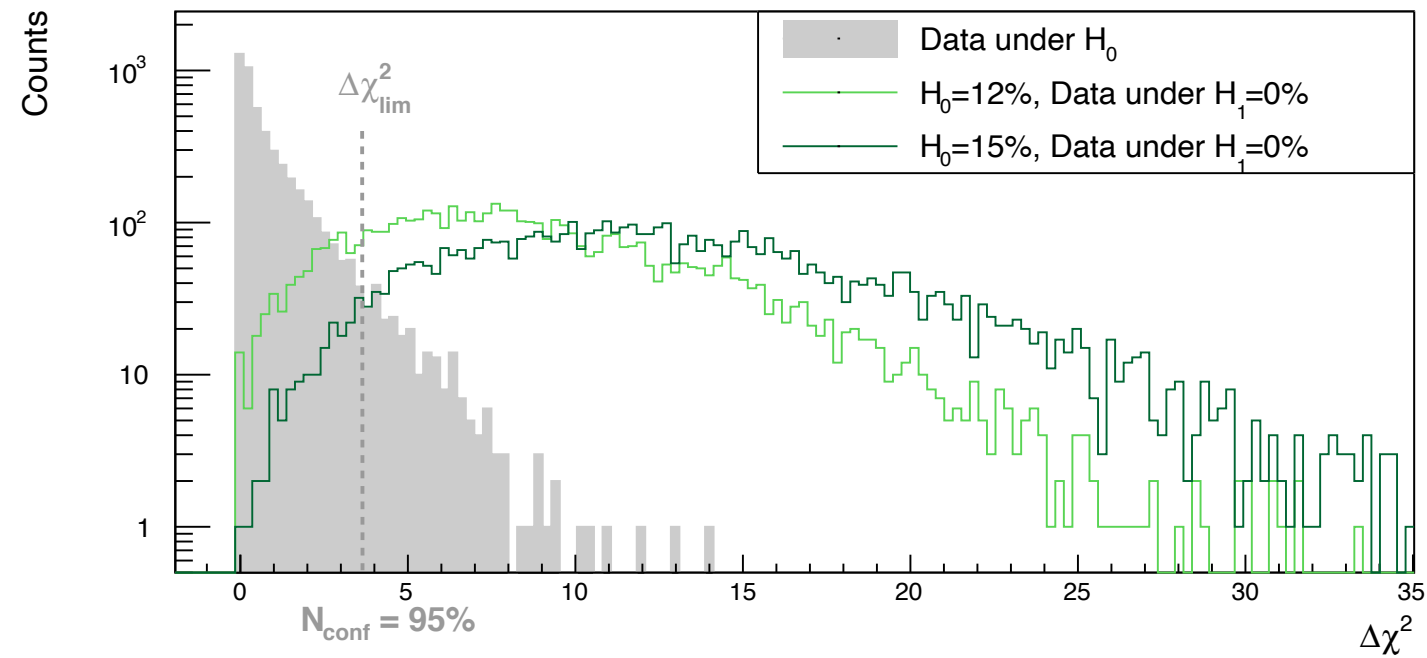
Modèle Huber extrait 12 heures après l'irradiation de cibles d' ^{235}U (cycles ILL 50 jours)

Contribution majeure ^{144}Pr , ^{92}Y et ^{106}Rh

Contribution restante estimée pour chaque isotope (code BESTIOLE) < 0.5%

Capture neutronique sur l'Aluminium

- Etude de sensibilité : STEREO est suffisamment sensible pour rejeter un *bump* de 10% avec un niveau de confiance de 95%.



- Normalisation absolue
 - Bon contrôle des incertitudes systématiques (puissance, nombre de protons cible, efficacité de la capture du neutron, efficacité de détection totale)

expected rate	VALUE	RELATIVE UNCERT. [%]
$N_{\nu/\text{fission}}$	1.8465	2.41
$N_{\text{fission/day}}$	$1.3123 \cdot 10^{23}$	1.50
T_{int}	$8.0995 \cdot 10^{-21}$	0.51
$N_{\text{p}^{\text{data/mc}}}$	0.9830	1.00
$\epsilon_{\text{n}}^{\text{det}}$	0.2049	0.54
$C_{\text{n}}^{\text{data/mc}}$	0.9774	0.86

➤ Flux du soleil, approximation

- $4p \rightarrow 2\text{He} + 4\text{ neutrinos} + \dots$
- Reaction releases $15.7\text{ MeV}/c^2$, or $4.12 \cdot 10^{-12}\text{ J}$ per Helium nucleus produced
- Solar constant is $1370\text{ Watts}/\text{m}^2$ at Earth's orbit

$1370 / (2.06 \cdot 10^{-6}) = \sim 65\,000\,000\,000$ neutrinos per cm **per second**