

Détection d'anti-neutrinos de réacteur à courte distance.

Maxime Péquignot

CEA Saclay
CEA/Irfu - Service de Physique Nucléaire

2 Juillet 2014



Qui suis-je ? Que fais-je ?

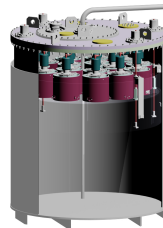
- Maxime Péquignot
- Diplômé de Phelma - Grenoble INP
- Motivation : sujet alliant physique des réacteurs et physique des particules, physique appliquée et fondamentale
- Sujet de thèse : Détection d'anti-neutrinos de réacteur à courte distance



$\sim 10 \text{ m}$

\longleftrightarrow

$\bar{\nu}_e \quad \bar{\nu}_e \quad \bar{\nu}_e \quad \bar{\nu}_e$



Deux expériences :

- Nucifer : compter le nombre de neutrinos en fonction du temps dans un but de non-prolifération nucléaire
- Stéréo : étudier la forme du spectre en énergie des neutrinos pour vérifier l'hypothèse d'un neutrino stérile

Histoire du neutrino

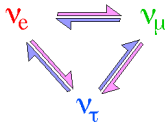
- 1930 : hypothèse de "neutrons" par Pauli pour expliquer le spectre de désintégration β moins :

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

- Interagit uniquement par interaction faible \rightarrow difficile à détecter mais ...
- ... en 1956 : première détection d'anti-neutrinos électroniques par Reines et Cowan avec un détecteur proche d'un réacteur
- 1968 : déficit de neutrinos solaires \rightarrow moins de neutrinos détectés qu'attendus
- Hypothèse de Pontecorvo : oscillations de neutrinos
- 1998 : oscillation observée par Super-Kamiokande
- Mesure du dernier angle de mélange θ_{13} par Daya Bay, Double Chooz et RENO

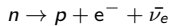
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

- Trois saveurs de neutrinos observées : electron, muon and tau



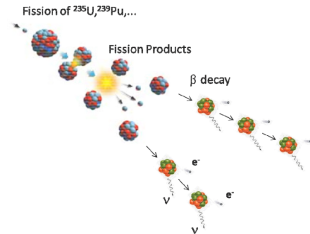
Anti-neutrinos de réacteur nucléaire et détection

- Fissions nucléaires dans le réacteur suivies de désintégrations bêta des produits de fission :



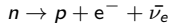
- Production intense et pure d'anti-neutrinos électroniques

$$\rightarrow \sim 1,9 \times 10^{20} \bar{\nu}_e / \text{s} / \text{GW}_{th}$$



Anti-neutrinos de réacteur nucléaire et détection

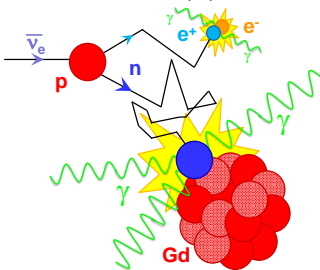
- Fissions nucléaires dans le réacteur suivies de désintégrations bêta des produits de fission :



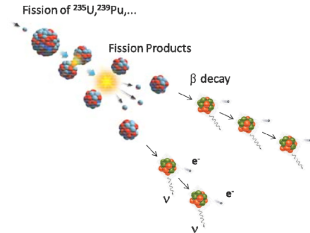
- Production intense et pure d'anti-neutrinos électroniques

$$\rightarrow \sim 1,9 \times 10^{20} \bar{\nu}_e / \text{s} / \text{GW}_{th}$$

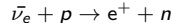
Prompt signal (ns): $E_{\text{prompt}} \propto E_{\nu} (1 - 8 \text{ MeV})$



Delayed signal (μs): $E_{\text{delayed}} \sim 8 \text{ MeV}$ on Gadolinium



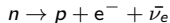
- Détection par la réaction de désintégration bêta inverse dans du liquide scintillant :



- Sélection des événements en énergie et en temps
- Très faible section efficace : $\sim 10^{-43} \text{ cm}^2$ à 1 MeV

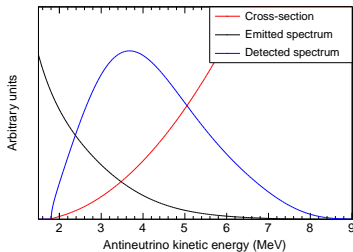
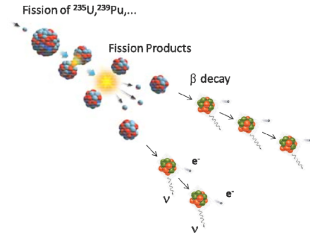
Anti-neutrinos de réacteur nucléaire et détection

- Fissions nucléaires dans le réacteur suivies de désintégrations bêta des produits de fission :

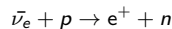


- Production intense et pure d'anti-neutrinos électroniques

$$\rightarrow \sim 1,9 \times 10^{20} \bar{\nu}_e / \text{s} / \text{GW}_{th}$$



- Détection par la réaction de désintégration bêta inverse dans du liquide scintillant :



- Sélection des événements en énergie et en temps

- Très faible section efficace :

$$\sim 10^{-43} \text{ cm}^2 \text{ à } 1 \text{ MeV}$$

Signal neutrino attendu

- S_{235U} : nombre de neutrinos émis par seconde et GW par l'uranium 235
- P_{th} : puissance thermique du réacteur
- N_p : nombre de protons libres dans le détecteur
- σ_{IBD} : section efficace d'interaction
- L : distance du détecteur par rapport au coeur

Nombre attendu de neutrinos interagissant dans le détecteur par jour :

$$\Rightarrow N_\nu = \frac{S_{235U} * P_{th} * N_p * \sigma_{IBD}}{4 * \pi * L^2}$$

Pour un détecteur d'un mètre cube placé à 10 m d'un réacteur de 100 MW

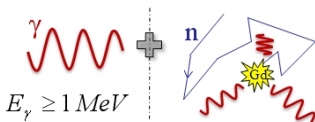
$$\Rightarrow N_\nu \sim 1300 \nu_e/\text{jour}$$

Défi : détecter ces neutrinos dans un important bruit de fond

Bruit de fond

ACCIDENTELS

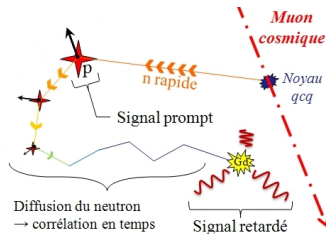
- Coïncidence fortuite de deux événements indépendants :
 - Gamma + capture de neutron
 - Gamma + gamma de haute énergie



- Blindage passif en plomb et polyéthylène pour les stopper
- Mesure en ligne dans 100 portes en temps décalées

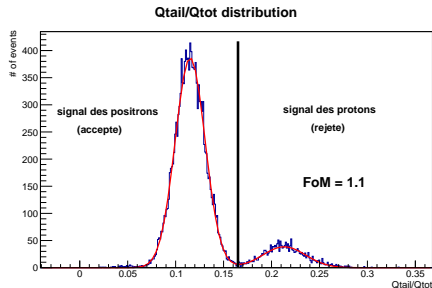
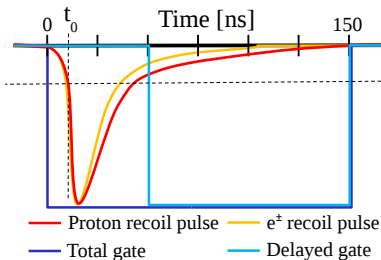
CORRÉLÉS

- Coïncidence suite à un même événement
 - Muon cosmique → neutron rapide



- Protection par enfouissement du détecteur et par un veto actif
- Mesure en réacteur OFF
- Pulse shape discrimination (PSD) en ligne

Pulse shape discrimination



- Prompt du neutrino : ionisation et annihilation du positron
 \Rightarrow petit Q_{tail}/Q_{tot}
- Prompt du neutron rapide : recul de proton
 \Rightarrow grand Q_{tail}/Q_{tot}
- Élimination du bruit de fond corrélé par la PSD (avant la soustraction OFF)

$$\Rightarrow FoM = \frac{\mu_2 - \mu_1}{2.35 * (\sigma_1 + \sigma_2)}$$

(dans l'exemple ci-dessus FoM = 1.1)

The Nucifer experiment



Nucifer

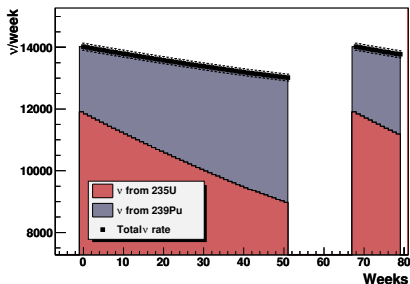
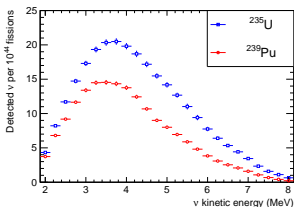
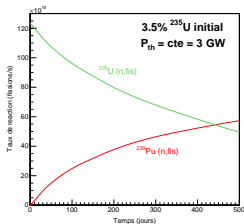


Neutrinos et non-prolifération nucléaire

- Le flux de neutrinos émis dépend à la fois de la composition du combustible et de la puissance du réacteur :

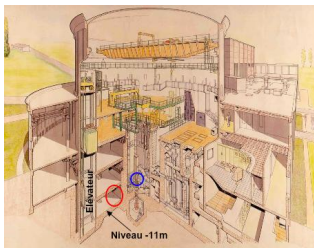
$$N_{\bar{\nu}_e} = \alpha * P_{th} * (1 + k(t)) \text{ avec } k(t) \text{ dépendant de la composition du combustible.}$$

3 GWth const, détecteur d'1 m³ à 25 m



- Informations en direct sur les opérations de l'exploitant
 - Méthode complémentaire pour connaître le burn-up du réacteur
- ⇒ Intérêt de l'AIEA pour la surveillance des réacteurs

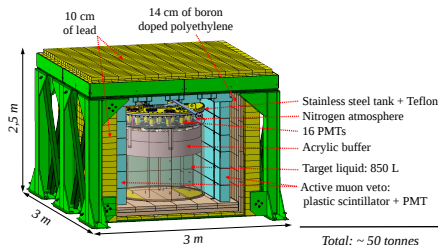
Caractéristiques du site et du détecteur



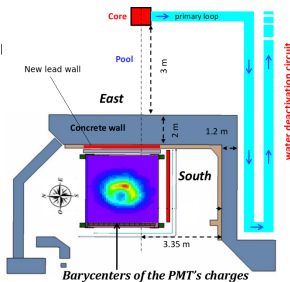
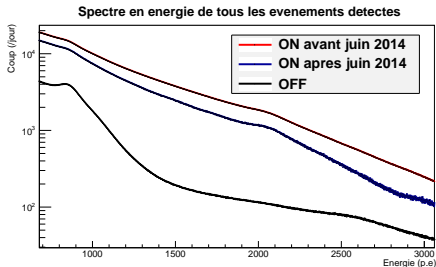
- Réacteur de recherche de 70 MW_{th}
- Distance du détecteur au coeur : ~ 7 m
⇒ Flux gamma important
- Attenuation par rapport aux muons cosmiques = 2.7
⇒ Peu protégé des muons cosmiques

Principales caractéristiques de NUCIFER :

- 850 L de liquide scintillant dopé au gadolinium (0.2%)
- Collection de lumière à travers un buffer en acrylique par 16 PM
- Canne de calibration interne

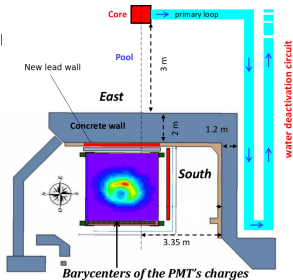
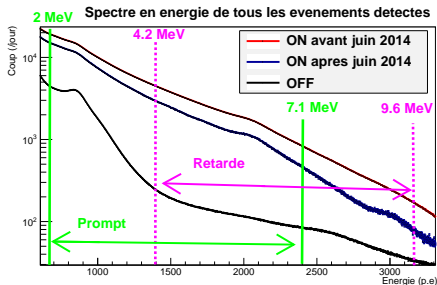


Spectre en énergie des événements détectés



- Fréquence de détection entre 2 MeV et 9 MeV = 115 Hz avant juin 2014
- Ajout d'un mur de 4 cm de plomb → 58 Hz après juin 2014 (18 Hz OFF)
- Mais toujours des gammas de haute énergie → bruit de fond accidentel

Spectre en énergie des événements détectés



- Fréquence de détection entre 2 MeV et 9 MeV = 115 Hz avant juin 2014
- Ajout d'un mur de 4 cm de plomb → 58 Hz après juin 2014 (18 Hz OFF)
- Mais toujours des gammas de haute énergie → bruit de fond accidentel

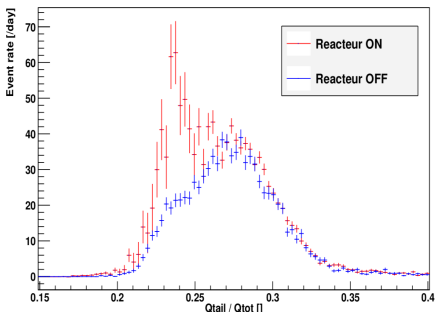
Résultats (mai 2013)

- Résultats (ON : 12 jours, OFF : 8 jours) :

	Taux d'accidentel	Taux de corrélés
Réacteur OFF	$(66 \pm 1) / \text{jour}$	$(360 \pm 8) / \text{jour}$
Réacteur ON	$(8511 \pm 3) / \text{jour}$	$(665 \pm 28) / \text{jour}$

→ $305 \pm 29 \nu / \text{jour}$

PSD de l'événement prompt



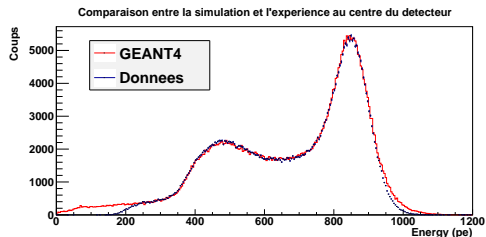
L'excès de corrélés n'est-il pas dû aux neutrons rapides venant du réacteur ?

- Grand $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{tot}}$: neutrons rapides
- Petit $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{tot}}$: γ , neutrinos
- Pas plus de neutrons lorsque le réacteur est ON que lorsqu'il est OFF

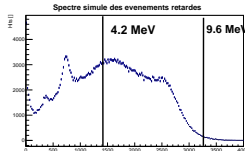
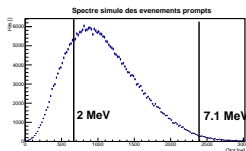
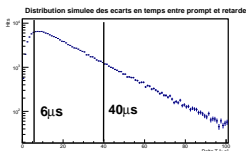
⇒ excès dû aux neutrinos

Simulation G4 de Nucifer

- Simulation G4 complète de Nucifer
- Calibration à différents points du détecteur (^{60}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs , AmBe)
- Bon accord au centre entre la simulation et l'expérience



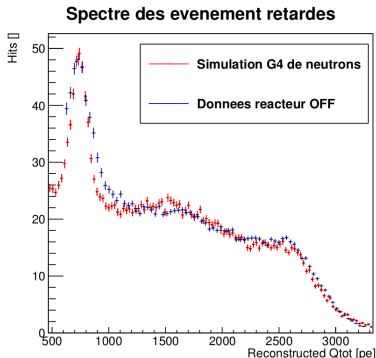
- Simulation d'Osiris et Nucifer → réponse simulée aux neutrinos venant d'Osiris :



- Détermination de l'efficacité due aux coupures en temps et en énergie :
⇒ $\epsilon(\text{détection}) = 0.31$

Erreurs systématiques

- Estimation de l'erreur systématique due aux coupures d'analyse :



- Incertitude sur l'échelle en énergie $\leq 2.5\%$
- Étude de la thermalisation et de temps de capture du neutron
- Efficacité absolue de détection :
 $\Rightarrow \epsilon(\text{détection}) = 0.31 \pm 0.02$

- Stabilité du détecteur pour le suivi du réacteur contrôlée à $\sim 2\%$
- Travaux en cours :
Finaliser la prédiction du taux de neutrinos (métrologie)
Exploiter la forme des distributions pour rejeter le bruit

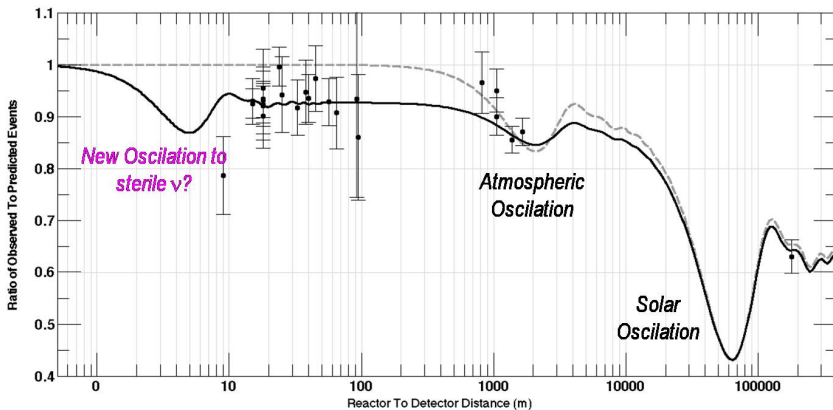
The Stereo experiment



Anomalie des anti-neutrinos de réacteur

- Réévaluation des spectres $\bar{\nu}_e$ émis par réacteur, Th. A. Mueller et al., Phys. Rev.C 83, 054615
- Réanalyse des expériences à courte distance, G. Mention et al., Phys. Rev. D 83, 073006

⇒ **déficit de neutrinos de 6.5%**



Nouvelle oscillation avec un neutrino stérile ($\Delta m^2 \gtrsim 0.5 \text{ eV}^2$, $\sin^2(2\theta) \sim 0.1$) ?

Objectif et spécifications de l'expérience Stéréo

OBJECTIF :

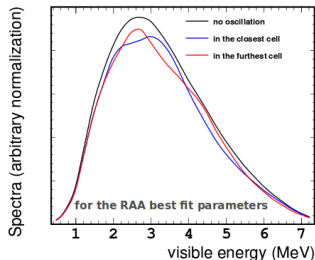
- Observer les effets de cette nouvelle oscillation à la fois en énergie et en distance

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

SPECIFICATIONS :

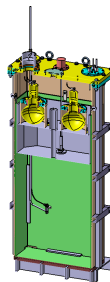
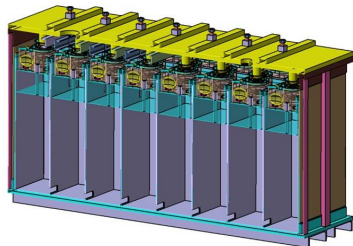
- Proche d'un réacteur à haut flux et à coeur compact : 10 m du réacteur de l'ILL
- Distorsions relatives du spectre à différentes distances pour être indépendant de la normalisation réacteur : détecteur segmenté en 6 cellules identiques
- Réponse précise du réacteur : technologie à base de liquide scintillant dopé au gadolinium

Oscillation phase shift between 2m apart cells



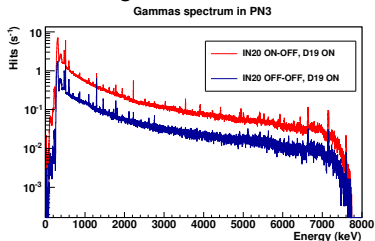
Géométrie du détecteur

- Six cellules ($40 \times 90 \times 90$) cm³ remplies de liquide scintillant dopé au Gd
- Une couronne entourant les cellules remplie de liquide non dopé
 - Éviter les fuites d'énergie
 - Détecter le bruit de fond externe
- Collection de la lumière :
 - Quatre photomultiplicateurs par cellule et un tampon en acrylique
 - Séparation optique par du VM2000
- Validation avec un prototype en juillet 2014

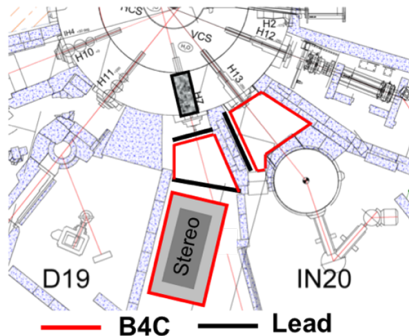


Protections contre les rayonnements

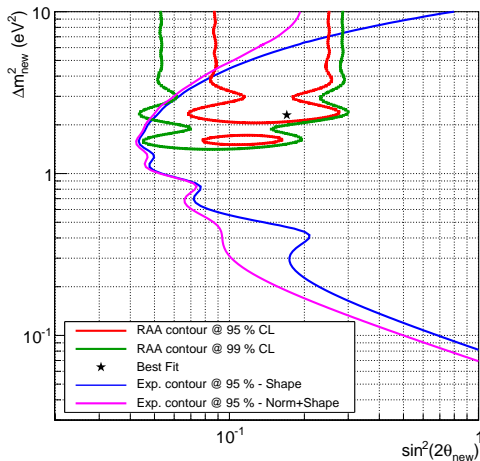
- Mesures à l'ILL avec des détecteurs neutrons et gammas



- Simulation MCNPX et G4 des neutrons rapides
- Protections à l'avant du détecteur et à la sortie de H13 :
 - Bouchon dans la ligne H13
 - Mur de plomb additionnels
 - Protections contre les neutrons : B_4C



Contours de sensibilité de Stéréo



- 300 jours de prise de données (6 cycles)
- Erreurs systématiques de reconstruction en énergie : $\delta E_{\text{scale}} = 2\%$
- Systématiques sur le spectre neutrino émises incluses
- Normalisation : 4%
- Signal / bruit = 1.5
- Signal prompt > 2 MeV
- Signal retardé > 5 MeV
- Taux attendu de neutrinos = $410 \bar{\nu}_e$ / jour

Conclusions

- Nucifer a détecté des neutrinos : $305 \pm 29 \nu/\text{jour}$
- Le taux d'accidentel reste au dessus des attentes malgré le rajout d'un mur de plomb
- Analyse en forme des spectres pour diminuer l'incertitude due au fort taux d'accidentel en cours
- Stéréo a pour but de tester un large domaine de l'anomalie réacteur
- Caractérisation complète du site de l'ILL et installation des blindages nécessaires
- Prototype d'une cellule attendu prochainement pour valider les propriétés du détecteur
- Début de la prise de données au printemps 2015.