

# STEREO Experiment

## Search for Sterile Neutrinos at ILL

Luis Manzanillas  
Pablo del Amo Sanchez  
Neutrino Group LAPP

Projet de Stage  
LAPP-Annecy-le-vieux - FRANCE

31 Mai de 2013

# Résumé

- 1 Introduction
- 2 Le détecteur STEREO
- 3 Sensibilité du détecteur
  - Plots d'exclusion
  - Incertitude sur la longueur
  - Résolution en énergie
  - Le bruit de fond
  - Conclusions sur la sensibilité du détecteur
- 4 Etude du blindage
  - Gammas
  - Cross-check d'atténuation des photons dans Geant4
  - Trigger Rate
  - Source de Neutrons
  - Conclusions sur le blindage

# Introduction

L'expérience STEREO a pour objectif confirmer l'existence d'un état de neutrino stérile recherchant un nouveau patron d'oscillation à courte distance.

Dans ce contexte, on explore la sensibilité du détecteur et la réponse du blindage au bruit de fond.

## Introduction: Oscillation du neutrino

Neutrinos oscillent pendant leur propagation. Les états de saveur sont une combinaison linéaire des états propres de masse.

Pour le cas de deux neutrinos on a :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1,2} U_{\alpha k} |\nu_k\rangle \quad (1)$$

La probabilité d'oscillation d'un état de saveur  $e$  à un état  $\mu$  est donnée par

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu}\right) \quad (2)$$

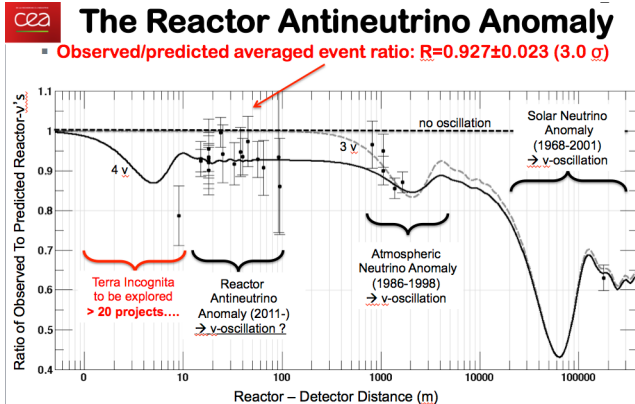
Et si on mesure  $L$  en  $Km$ , et  $E$  en  $GeV$  on a :

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1,27 \frac{\Delta m^2 L}{E_\nu}\right) \quad (3)$$

# Introduction

**Pourquoi cet intérêt de rechercher un nouvel état de neutrino?**

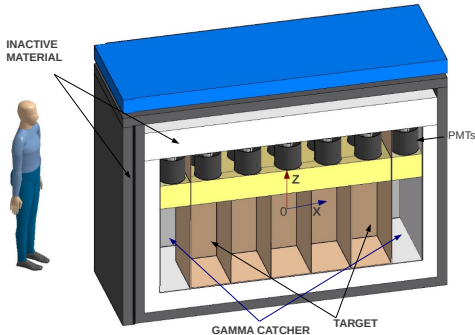
# Introduction: L'anomalie du réacteur



Une interprétation de ce déficit est l'existence d'un nouvel état de neutrino. Le meilleur fit donne  $\Delta m_{new}^2 = 2,3 \pm 0,1 \text{ eV}^2$  et  $\sin^2(2\theta_{new}) = 0,17 \pm 0,04$

# Le Détecteur STEREO

## STEREO



## caractéristiques

Cinq cells avec liquide scintillateur.

La taille de chaque cell est de 90 cm de haut par 1,1 m de largeur et 40 cm de large.

200000 événements attendus pendant la période d'acquisition des données, cad 40000 par cell.

Le point central du détecteur situé à environ 8 mètres du centre du réacteur.

# Sensibilité du détecteur

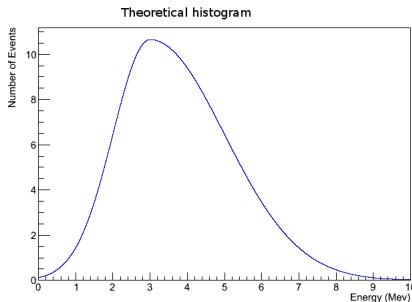
*Est STEREO sensible à la zone d'intérêt?*

$$(\Delta m_{new}^2 = 2,3 eV^2 \text{ et } \sin^2(2\theta_{new}) = 0,17)$$



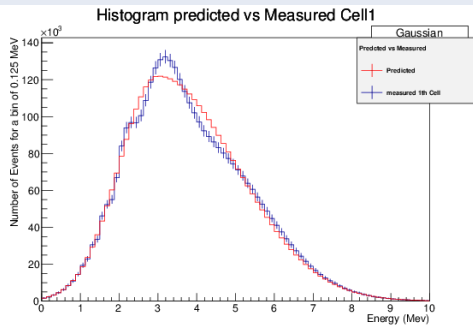
# Spectres théoriques (1 cellule)

## Spectre attendu sans oscillation



Spectre theorique attendu sans oscillation. STEREO recherche la déformation de cet spectre

## Spectre attendu avec oscillation

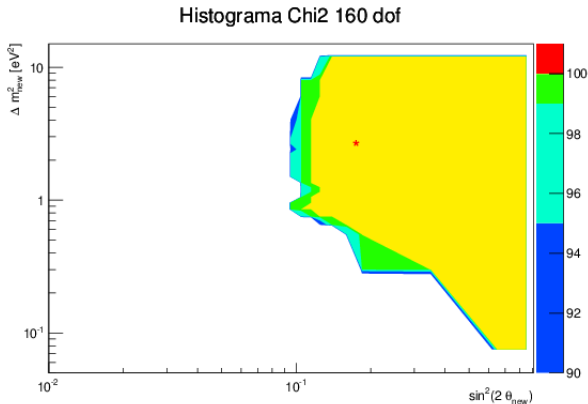


Histogramme prenant en compte les effets de l'oscillation et spectre theorique normalisé au le nombre d'événements avec oscillation

## Construction de $\chi^2$

- On a calculée le  $\chi^2$  de la différence entre le spectre sans oscillation normalisé au nombre d'événements observé dans chaque cell el le spectre avec des effets d'oscillation.
- On a considéré l'intervalle d'énergie entre 2.8-7 MeV, avec une bin de largeur de 0,125 MeV (33 bins). C'est à dire on aura 33-1 degrés de liberté (-1 par la normalisation).
- Pour les 5 cells on aura un total de 132 dof
- Pour 132 dof on a un niveau de confiance de  $2\sigma = 95\%$  pour  $\chi^2 = 190,5$  et de  $5\sigma = 99,9999\%$  pour  $\chi^2 = 248$ .
- Pour éliminer les effets des fluctuations statistiques, nous avons augmenté le nombre d'événements simulés par 100, tout en gardant la relation dans l'erreur relative avec le nombre totale d'événements attendus par cell(40000).

## Plot d'exclusion pour un expérience idéale



Exclusion à  $5\sigma$  (jaune) de que que le spectre observé soit le spectre avant oscillation

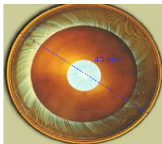
# Incertitude sur la longueur

## Considerations

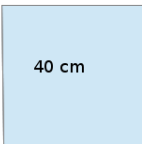
On aura deux sources d'incertitude en la longueur:

- position d'origine (40 cm)
- position de détection (40 cm)

Nuclear core

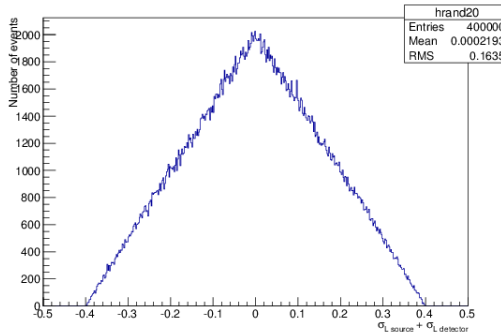


Cell Width



## Incertitude sur la longueur

Random numbers for  $\sigma_L$  total

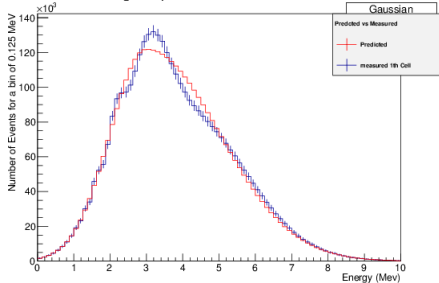


Histogramme avec  $\delta L$

# Incertitude sur la longueur

## Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation

Histogram predicted vs Measured Cell1

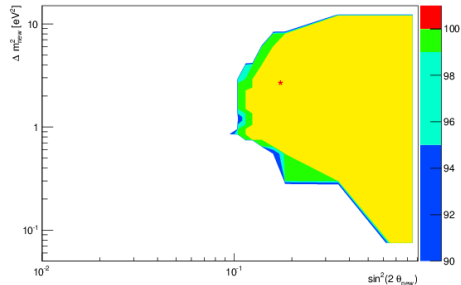


$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{new}) \sin^2 \left( 1,27 \frac{\Delta m_{new}^2 L}{E \bar{\nu}_e} \right)$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_n) \sin^2 \left( 1,27 \frac{\Delta m_n^2 (L + \delta L)}{E \bar{\nu}_e} \right)$$

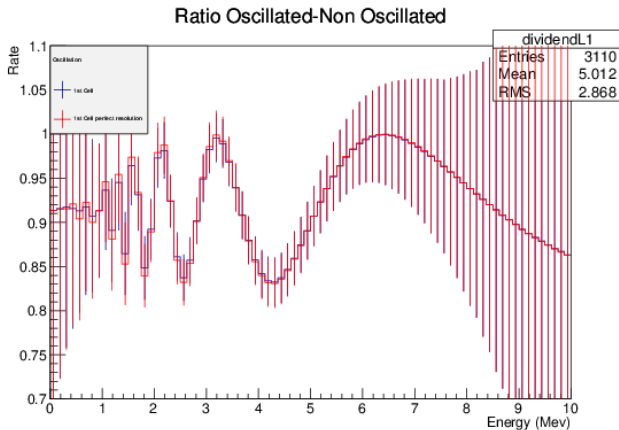
## Exclusion avec $\delta L$

Histograma Chi2 160 dof



Exclusion avec  $5 \sigma$  (jaune) de que que le spectre soit différent à un sans oscillation

# Rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation



Effets de l'incertitude en  $L$  sur le rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation

# Résolution en énergie

## Considerations

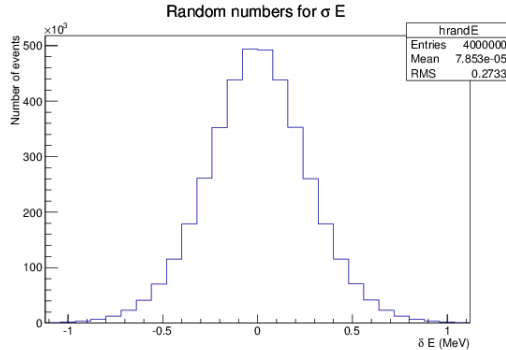
Nous avons considéré une résolution en énergie comme suit:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0,14}{\sqrt{E}} \quad (4)$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{new}) \sin^2 \left( 1,27 \frac{\Delta m_{new}^2 L}{E \bar{\nu}_e} \right)$$

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_n) \sin^2 \left( 1,27 \frac{\Delta m_n^2 (L + \delta L)}{E \bar{\nu}_e + \delta E} \right)$$

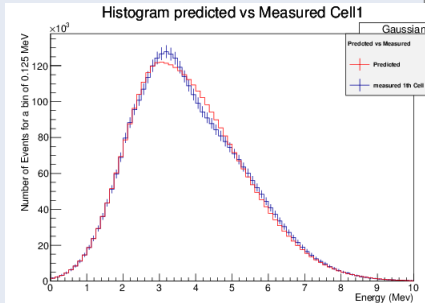
## Résolution en l'énergie mesurée



Histogramme avec  $\delta E$

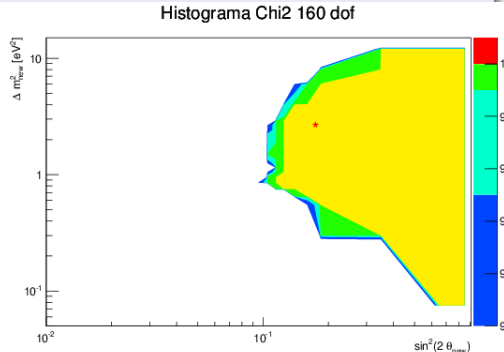
# Résolution en énergie

## Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation



Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation et des effets de résolution en la position et l'énergie

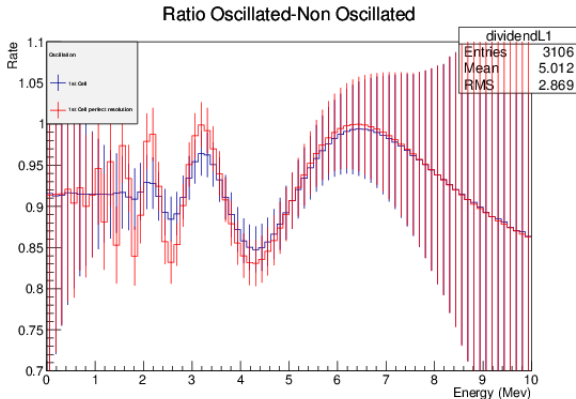
## Exclusion avec $\delta L$ et $\delta E$



Exclusion avec  $5\sigma$  (jaune) de que que le spectre soit différent à un sans oscillation



# Rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation cell1



Effets de l'incertitude en  $L$  et  $E$  sur le rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation cell1

## Le bruit de fond

On a supposé que le nombre total d'événements a une contribution constante de bruit de fond dans l'intervalle considéré (2-7 MeV) donnée par

$$N_B = \frac{B}{S} N_s \quad (5)$$

avec  $\frac{S}{B} = 1,5$ . Donc, on aura un effet traduit par une hausse de l'erreur dans le nombre d'événements enregistrés par chaque bin.

$$\sigma_{Ns} = \sqrt{\sigma_{Ntot}^2 + \sigma_{NB}^2} \quad (6)$$

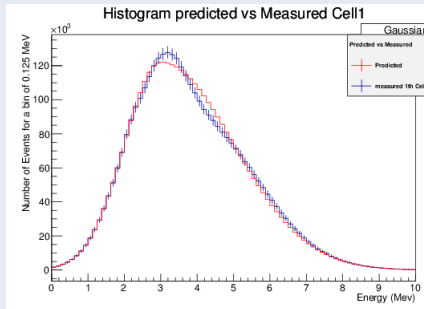
ce qui donne:

$$\sigma_{Ns} = \sqrt{Ns + 2N_B(cte)} \quad (7)$$

avec  $N_B = 333,3$  pour un bin de  $0.125 \text{ MeV}$

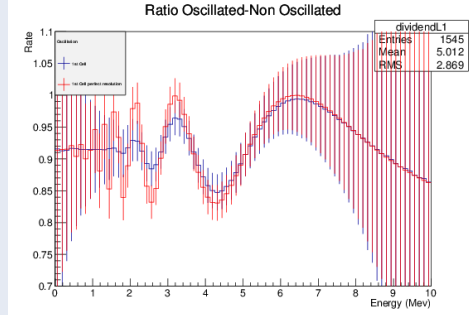
# Le bruit de fond

## Spectre attendu sans oscillation et avec oscillation



Histogramme prenant en compte les effets de l'oscillation et des effets de résolution en la position, l'énergie et le bruit de fond

## Rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation

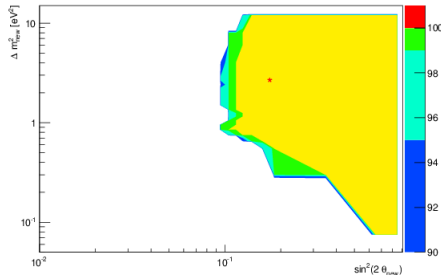


Effets de l'incertitude en  $L$  et  $E$  et le bruit de fond sur le rapport entre les spectres oscillés et sans oscillation

# Plots d'exclusion

## Plots d'exclusion pour un expérience idéale

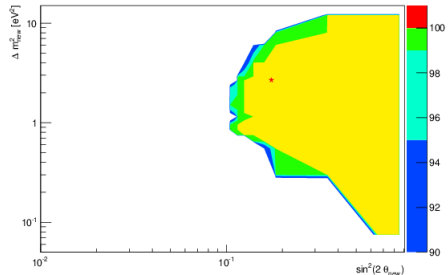
Histograma Chi2 160 dof



Exclusion avec un niveau de confiance de 5  $\sigma$  (jaune)

## Exclusion avec incertitude en $L$ , $E$ et le bruit de fond

Histograma Chi2 160 dof



Exclusion avec un niveau de confiance de 5  $\sigma$  (jaune).

## Conclusions sur la sensibilité du détecteur

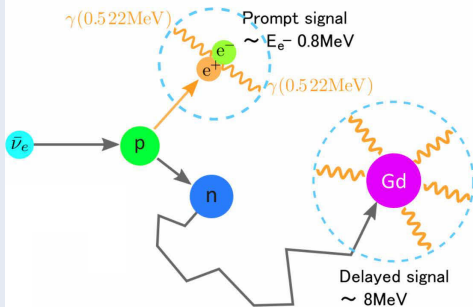
- STEREO est sensible à la zone d'intérêt
- Grâce à la petite taille du réacteur de l'ILL est possible d'explorer oscillations à très courte distance
- Les effets sur la résolution en énergie ont un impact plus importants pour l'exclusion que les effets sur l'incertitude en  $L$

# Etude du blindage

## *Etude du bruit de fond*

# Sélection des candidats neutrinos

## Réaction attendue



Un neutrino interagit avec un proton, ce qui donne un neutron plus un positron

## Coupures d'énergie

- Prompt: Si  $E$  déposé dans le Target  $\in [2-8] \text{ MeV}$
- Delayed: Si  $E$  déposé dans le Target +  $E$  déposé dans le GC  $\in [5-10] \text{ MeV}$

## ILL Backgrounds

Environnement radioactif élevée, qui produit des neutrons et des gammas partout

## Etude du blindage

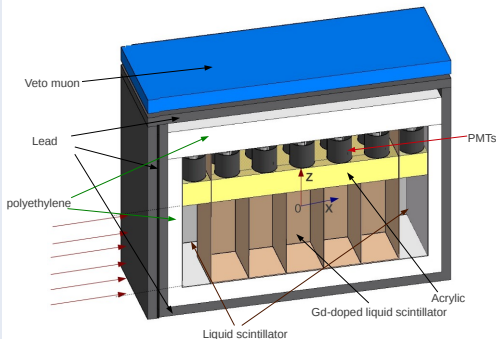
### Quel type d'information nous souhaitons?

- Quelles sont les contributions des différents bruits de fond (gammas, neutrons)?
- Quelle est la réponse du blindage pour différents énergies?
- Où est déposée l'énergie des particules et dans quels matériaux (Target, GC, Buffer, Inactif)?



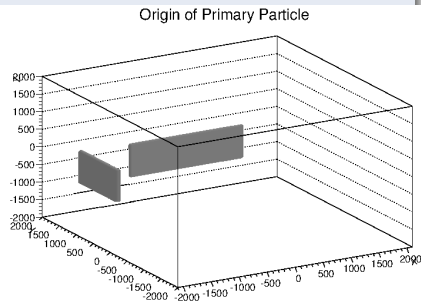
# Détecteur STEREO

## Géométrie du détecteur STEREO



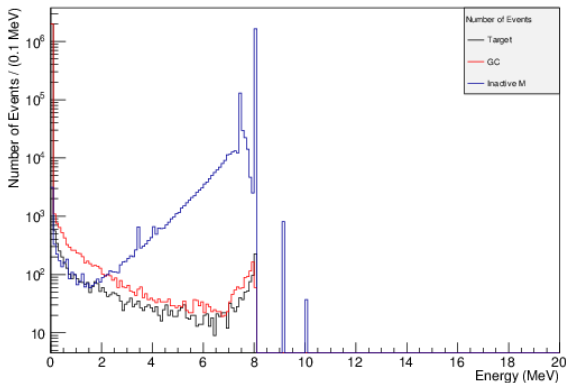
On a donné une direction perpendiculaire au détecteur

## Position des Sources Gamma



On a défini une source à côté et autre en face du détecteur STEREO

# Spectre d'énergie déposé pour une source lateral



Gammas de 8 MeV: La plupart de l'énergie est déposée dans le matériau inactif

# Attenuation

Le nombre de particules non perturbées  $N(x)$  traversant un matériau donné diminue de façon exponentielle par rapport à le nombre initial de particules  $N(0)$  incidente sur le matériau:

$$N(x) = N(0)e^{-(\frac{\mu}{\rho})\rho x} \quad (8)$$

où le *coefficient d'atténuation de masse*  $\mu/\rho$  est une fonction de l'énergie. On compar  $\mu/\rho$  observé en utilisant la simulation STEREO Geant4 avec les valeurs données par NIST (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef.html> ).

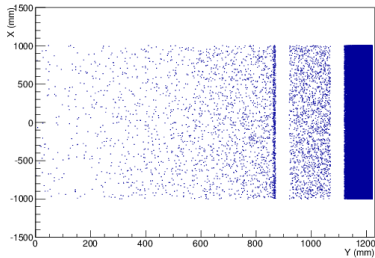
On peut soit :

- fit equation 1 à la distribution de la position de la première interaction de photons (premier électron ou positron produit)
- compter le nombre de photons  $N(x)$  que interagissent après avoir parcouru une distance  $x$ , et utiliser

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho x} \ln \frac{N(0)}{N(x)}$$

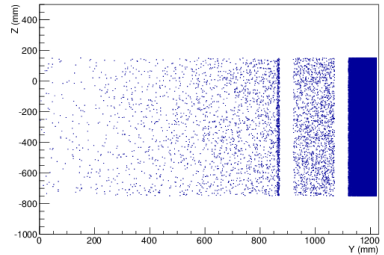
# Position de la première interaction des particules incidentes (Ex: photons monochromatiques de 4 MeV)

*Plane XY*



La plupart des particules interagissent d'abord avec le plomb. Le blindage remplit sa fonction

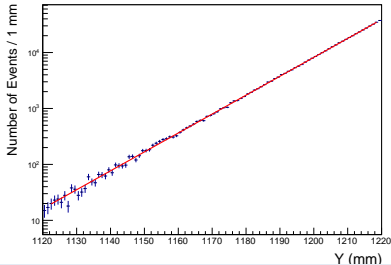
*Plane ZY*



On peut voir les différentes parties du détecteur. Blanks sont "mechanical margins"

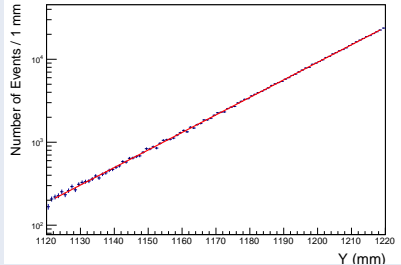
# Atténuation

## *Position du 1er interaction des photons (1 MeV) dans le plomb*



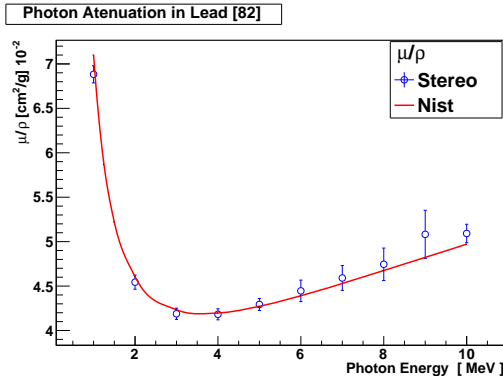
fit avec une courbe exponentielle

## *Position du 1er interaction des photons (5 MeV) dans le plomb*



fit avec une courbe exponentielle

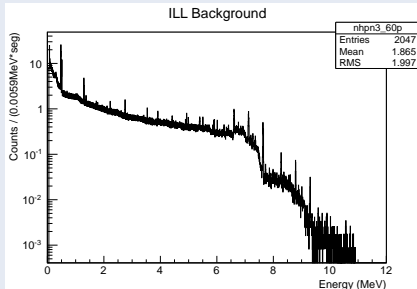
# Comparaison de $\mu/\rho$ calculé avec Geant4 STEREO et le rapporté par le NIST



Résultats sont en bon accord avec les valeurs NIST. Les barres d'erreur bleu sont donnés par le fit, tandis que les erreurs du NIST sont d' "a few percent"

# Gamma Background

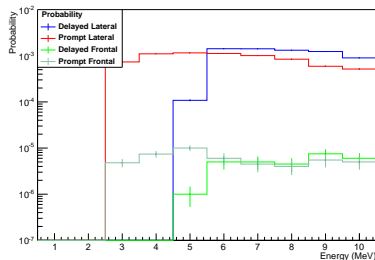
## Measured Spectrum at ILL



Résultats expérimentaux de la campagne dans l'ILL

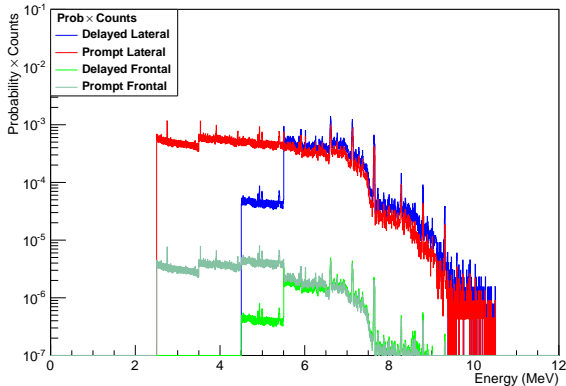
En utilisant le même  $\phi_\gamma$  sur les quatre côtés verticaux de détecteur, non  $\phi_\gamma$  sur ou sous le détecteur.

## Probabilité de générer un événement



Résultats de la simulation avec Geant4

# Gamma Background ILL $\times$ Probabilité



contribution principale: 3-7 MeV  $\gamma$

Nb: Facteur de normalisation  $S_{shielding}/S_{Ge}$  non inclus



# Trigger Rate

$$R_{\text{trigger}} = S_{\text{stereo}} \int \phi(E) P(E) dE \quad (10)$$

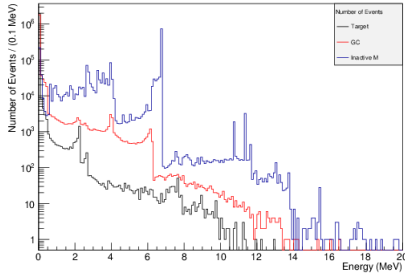
Accidentals event rate: fenêtre de  $50\mu s$

Delayed Frontal/s	Delayed Lateral/s	Total Delayed/s	Prompt Frontal/s	Prompt Lateral/s	Total Prompt/s	Accidentals/s
1	341	342	2	767	769	13.2

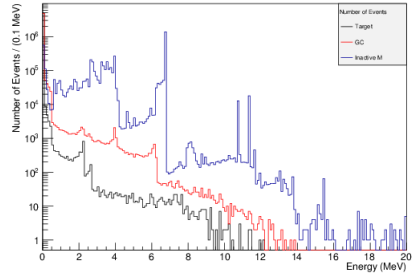
A comparer au but Delayed/s  $\leq 1$  et Prompt/s  $\leq 350$

# Energie déposée dans le cas de une source de neutrons

*Neutrons incidents d'un côté du détecteur avec une énergie de 4 MeV*

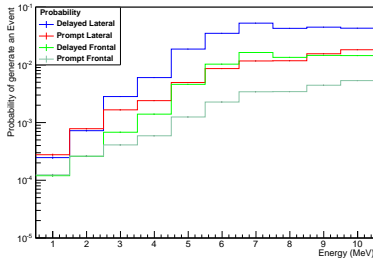


*Neutrons incidents en face du détecteur avec une énergie de 4 MeV*



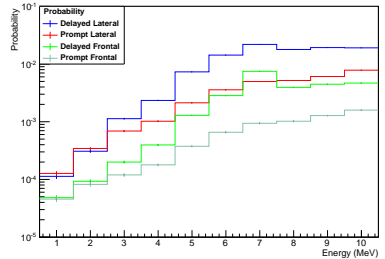
# Neutron Background

*Probabilité de générer un événement en prenant en compte une surface seulement le target*



Résultats de la simulation avec Geant4

*Probabilité de générer un événement en prenant en compte toute la surface*



Résultats de la simulation avec Geant4

## Conclusions sur le blindage

- Gammas: la plupart de triggers sont produits par  $\gamma$ 's provenant des côtés du détecteur.
- Gammas: la principale contribution au trigger sont les  $\gamma$ 's entre 2-7 MeV provenant des côtés du détecteur.
- Gammas: est nécessaire identifier la direction de gammas afin de renforcer le blindage où soit nécessaire

*Merci de votre attention*

# Source Frontal pour tout la géométrie du détecteur

E(MeV)	Total	Prompt	P/T ( $10^{-5}$ )	Delayed	D/T ( $10^{-4}$ )
1	4981471	227	$4,5 \pm 0,3$	241	$0,4 \pm 0,03$
2	4990114	410	$8,2 \pm 0,4$	464	$0,9 \pm 0,04$
3	4992976	598	$11,9 \pm 0,5$	998	$1,9 \pm 0,06$
4	4993322	895	$17,9 \pm 0,6$	1977	$3,9 \pm 0,08$
5	4991718	1874	$37,5 \pm 0,9$	6451	$12,9 \pm 0,2$
6	1995814	1311	$65,7 \pm 1,8$	5684	$28,4 \pm 0,3$
7	1994492	1876	$94,1 \pm 2,1$	9542	$47,8 \pm 0,5$
8	1993593	2040	$102,3 \pm 2,2$	7857	$39,4 \pm 0,4$
9	1992720	2553	$128,1 \pm 2,5$	8916	$44,7 \pm 0,5$
10	1992918	3171	$159,1 \pm 2,3$	9333	$46,8 \pm 0,5$

Prompt: 2-8 MeV

Delayed: 5-10 MeV

# Source Lateral pour tout la géométrie du détecteur

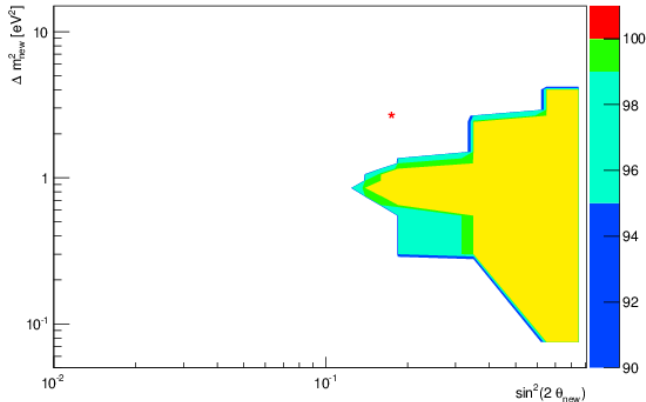
E(MeV)	Total	Prompt	P/T ( $10^{-4}$ )	Delayed	D/T ( $10^{-4}$ )
1	4991482	633	$1,2 \pm 0,5$	565	$1,1 \pm 0,04$
2	4997595	1721	$3,4 \pm 0,8$	1543	$3,1 \pm 0,07$
3	4998676	3450	$6,9 \pm 1,2$	5662	$11,3 \pm 0,2$
4	4998772	5117	$10,2 \pm 1,4$	11679	$23,4 \pm 0,2$
5	4998311	10642	$21,3 \pm 1,4$	36596	$73,2 \pm 0,4$
6	1998871	7156	$35,8 \pm 2,1$	28567	$142,9 \pm 0,8$
7	1998150	9950	$49,8 \pm 4,2$	43734	$218,9 \pm 1$
8	1997545	10369	$51,9 \pm 4,9$	35737	$178,9 \pm 0,9$
9	1996699	12144	$60,8 \pm 5,1$	38661	$193,6 \pm 1$
10	1996445	15648	$78,4 \pm 6,2$	38146	$191,1 \pm 1$

Prompt: 2-8 MeV

Delayed: 5-10 MeV

# Exclusion avec incertitude en $L$ , cas d'un grand réacteur

Histograma Chi2 160 dof



Exclusion avec un niveau de confiance de  $5 \sigma$  (jaune).