

Résultats et perspectives de l'expérience KamLAND

Jean-stéphane Ricol

Tohoku University

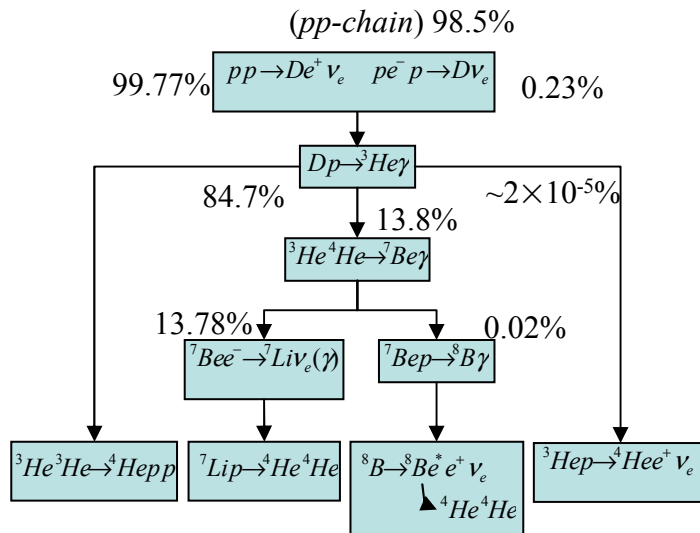
KamLAND Collaboration

Plan

- Les neutrinos solaires
- Présentation de KamLAND
- Résultats sur l'oscillation des antineutrinos réacteurs
- Purification en vue de la détection en temps réel des neutrinos solaires ${}^7\text{Be}$
- Résumé

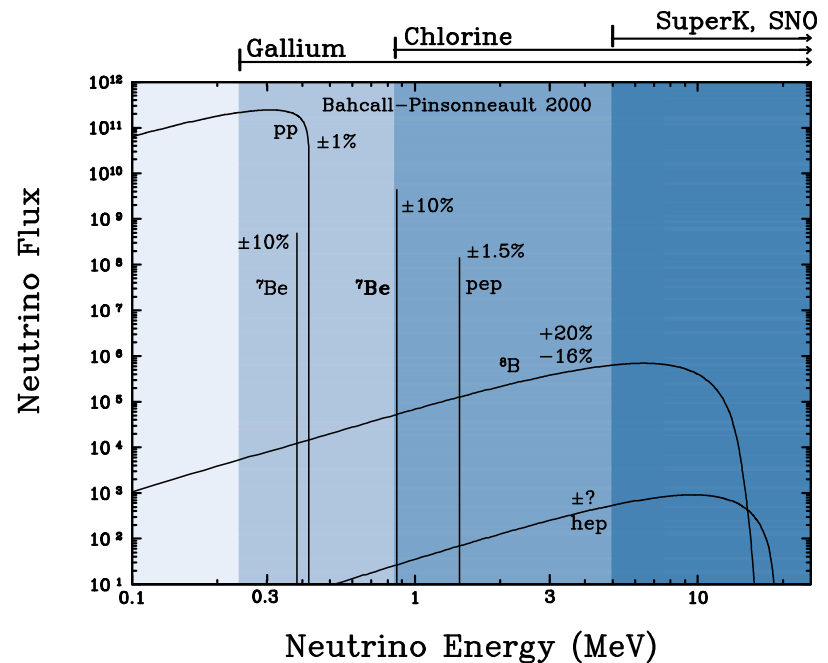
Les neutrinos solaires

Modèle solaire :

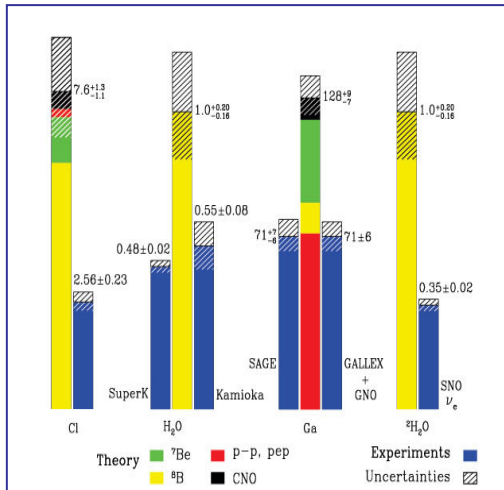


Seuls les neutrinos permettent d'avoir accès au cœur dense du soleil

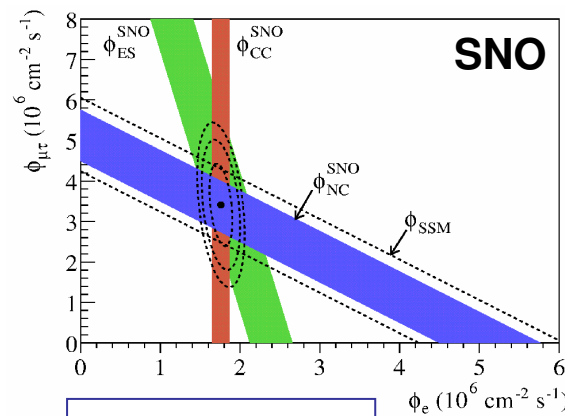
- Premières expériences radiochimiques
→ aucune information énergie
- SNO, SK: seulement 1/2000 des ν solaires détectés en temps réel



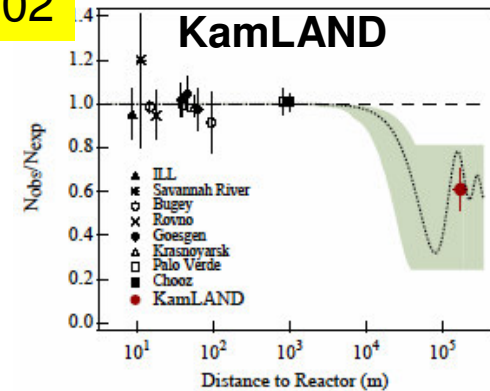
Le problème des neutrinos solaires



Pendant plus de 30 ans, 2-3 fois moins de neutrinos observés:



$$\Phi_{\text{tot}} = \Phi_{\text{SSM}}$$



Déficit $\bar{\nu}_e$ réacteurs



Oscillation des neutrinos solaires

Oscillation des neutrinos

Etat propre
saveur
(interaction)

$$|\nu_e(0)\rangle = \cos \theta_{12} |\nu_1\rangle + \sin \theta_{12} |\nu_2\rangle$$

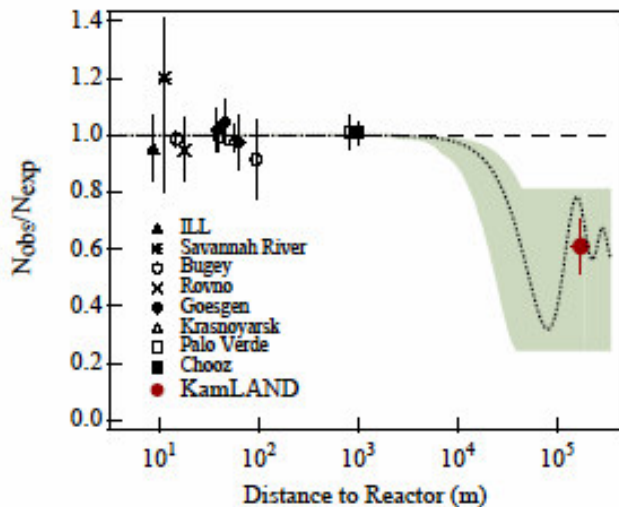
Etat propre
masse
(propagation)

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos \theta_{12} e^{(iE_1 t)} |\nu_1\rangle + \sin \theta_{12} e^{(iE_2 t)} |\nu_2\rangle$$

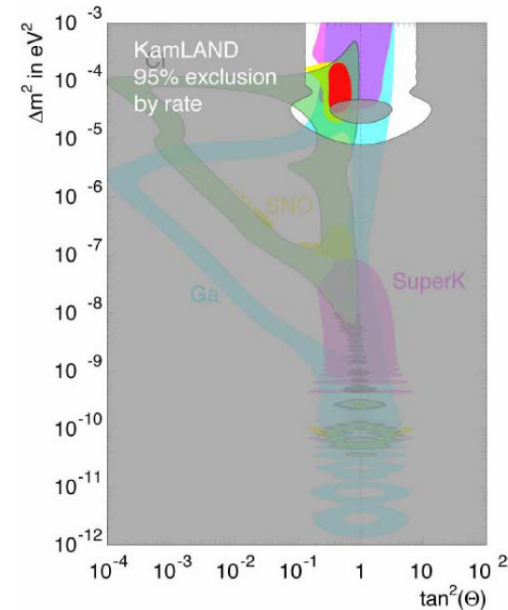
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m_{12}^2 [eV^2] L [m]}{E [MeV]} \right)$$

Oscillation change le taux et le spectre observé

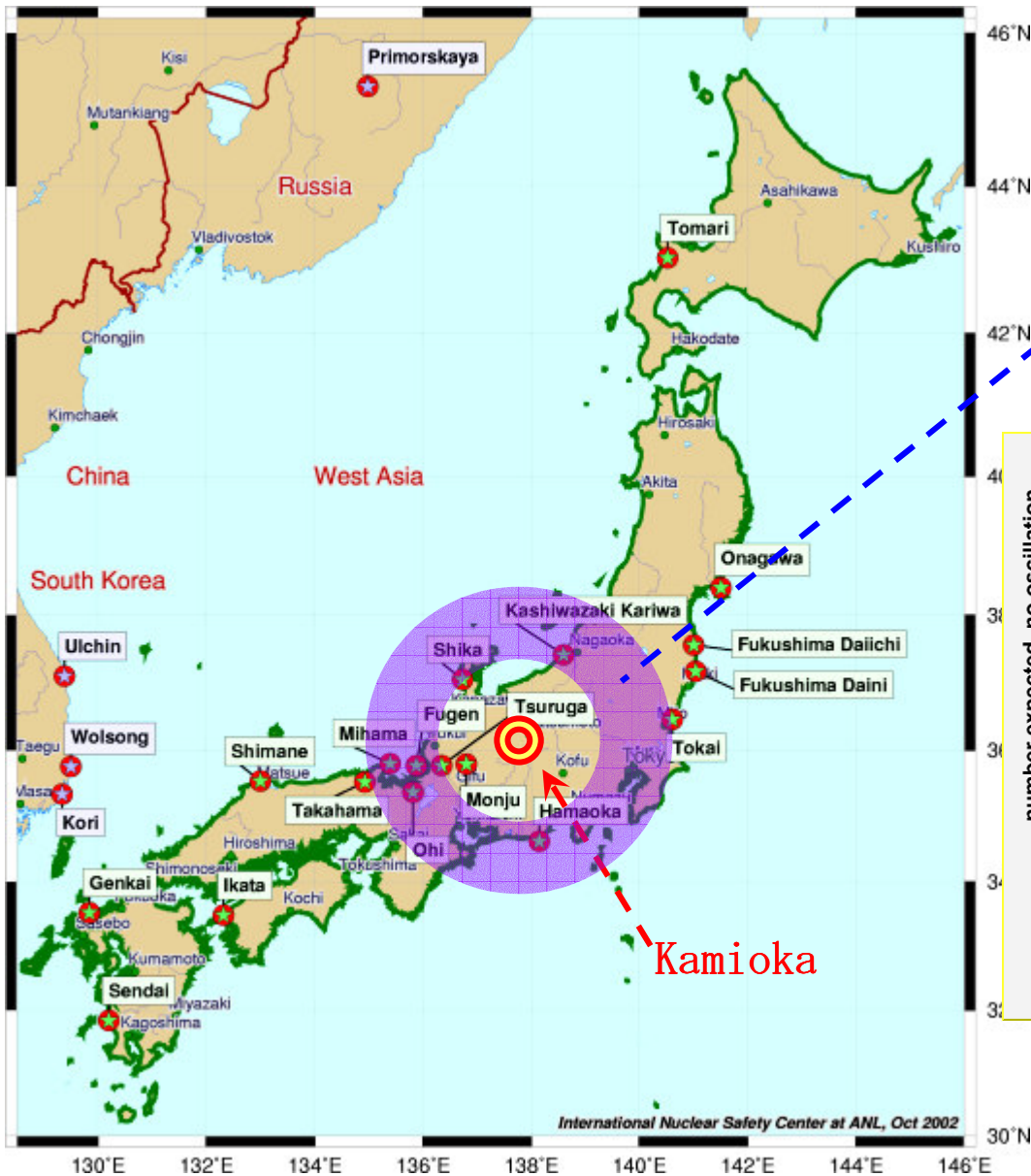
$$\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2$$



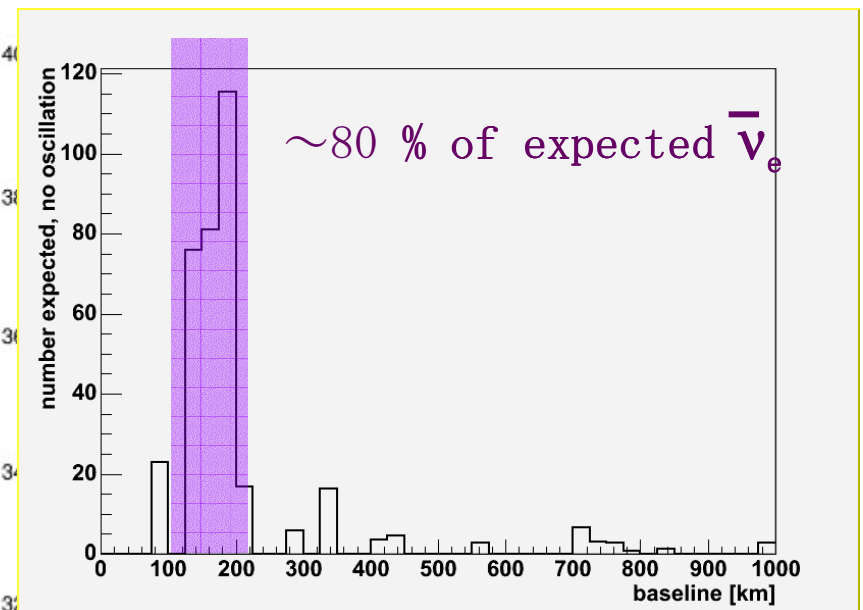
Premiers résultats
KamLAND 2002



Le site de l'expérience

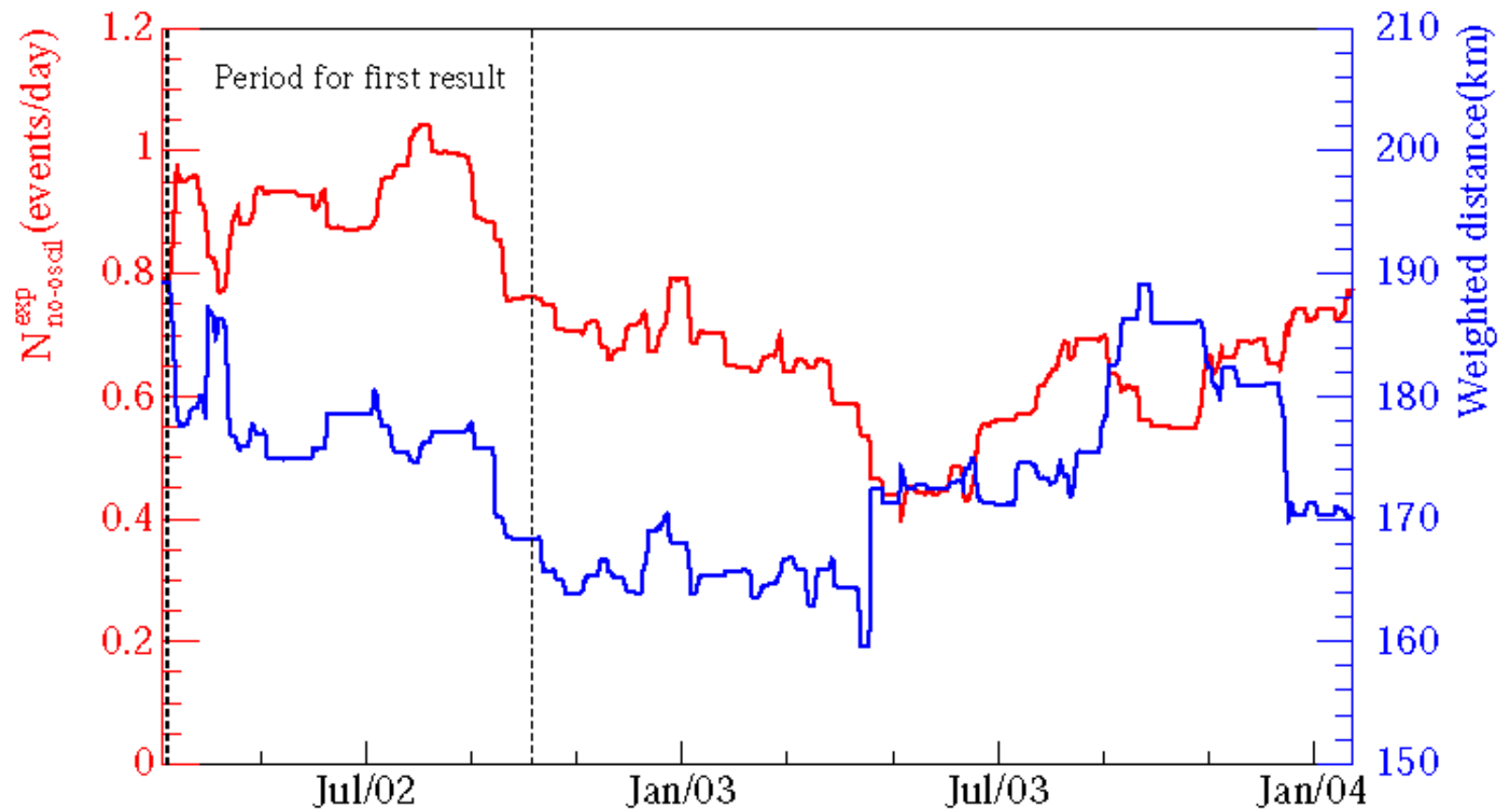


70 GW
(~7 % puissance mondiale)
à
 $L \sim (175 \pm 35) \text{ km}$

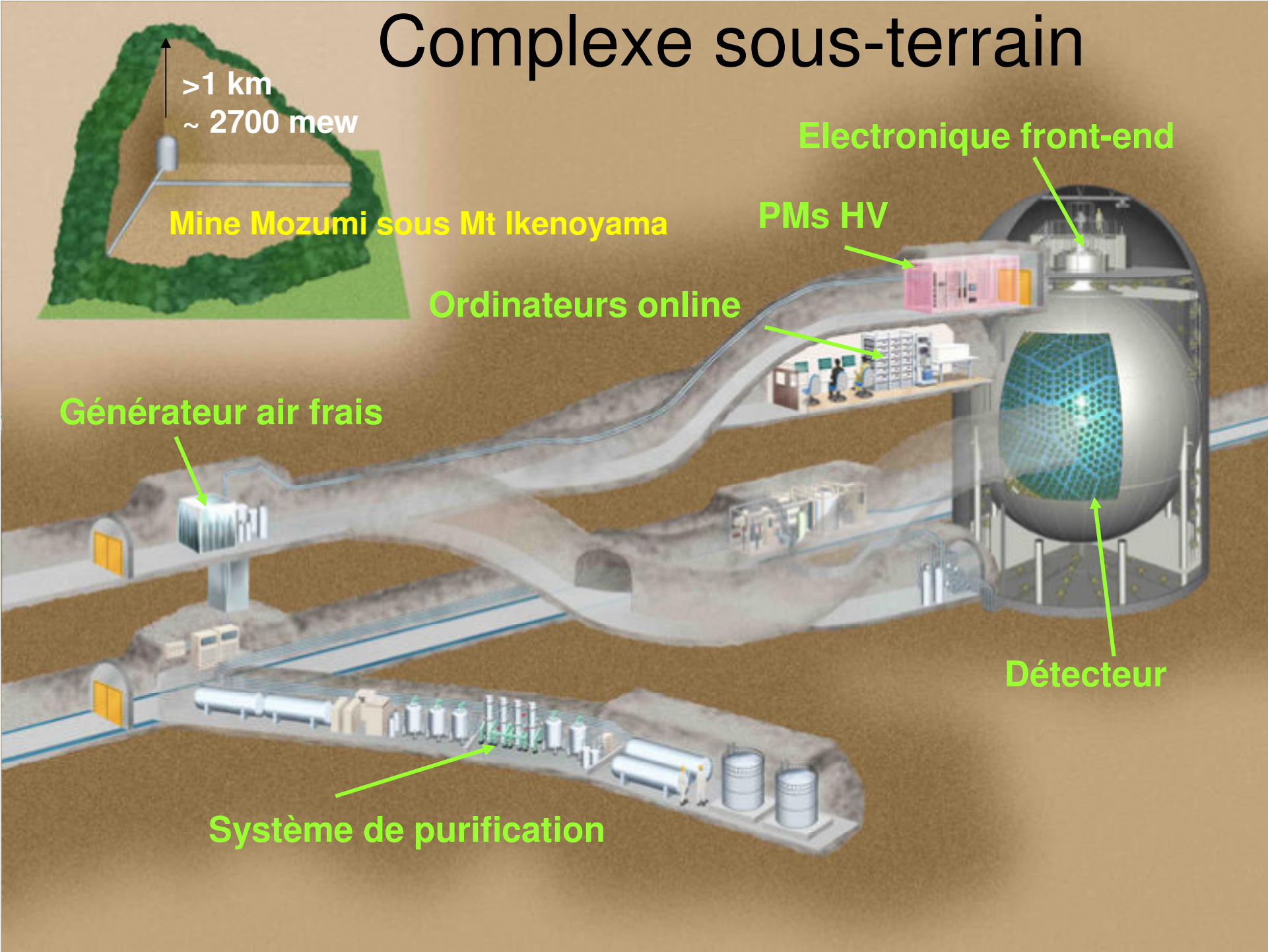


Information réacteurs

Companies électriques → puissance thermique et composition du 'carburant' nucléaire

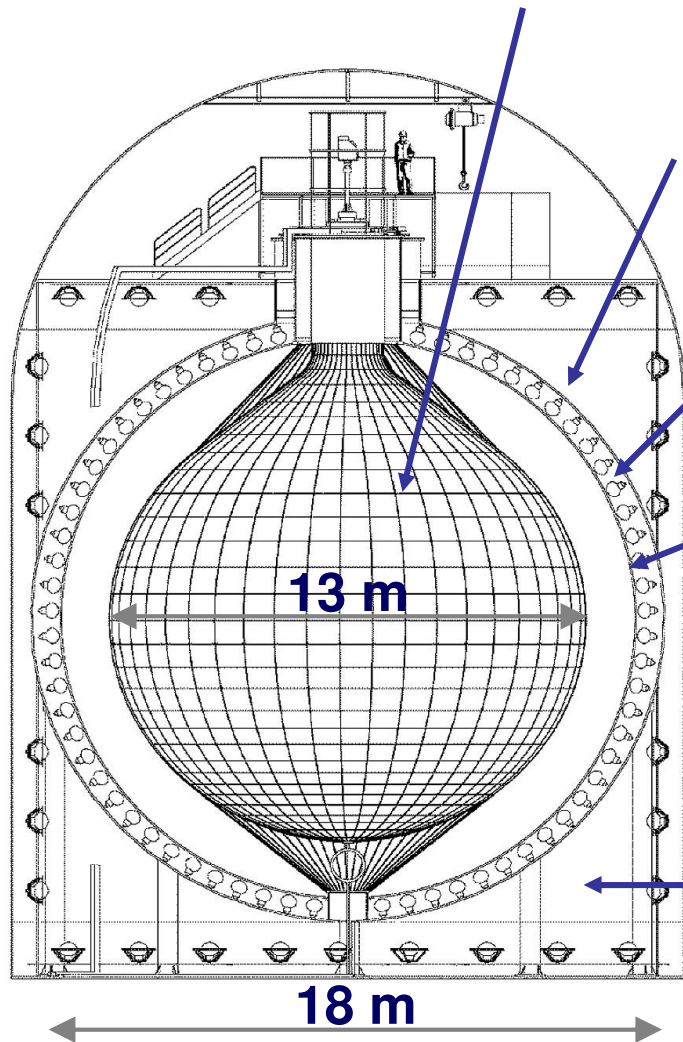


Complexe sous-terrain



Le détecteur

- 1000 tonnes de scintillateur liquide
(80% dodecane + 20% pseudocumene + 1.52 g/l PPO)



- Sphère en acier de 18m de diamètre remplie de MO ($\Delta\rho = 0.04\%$)

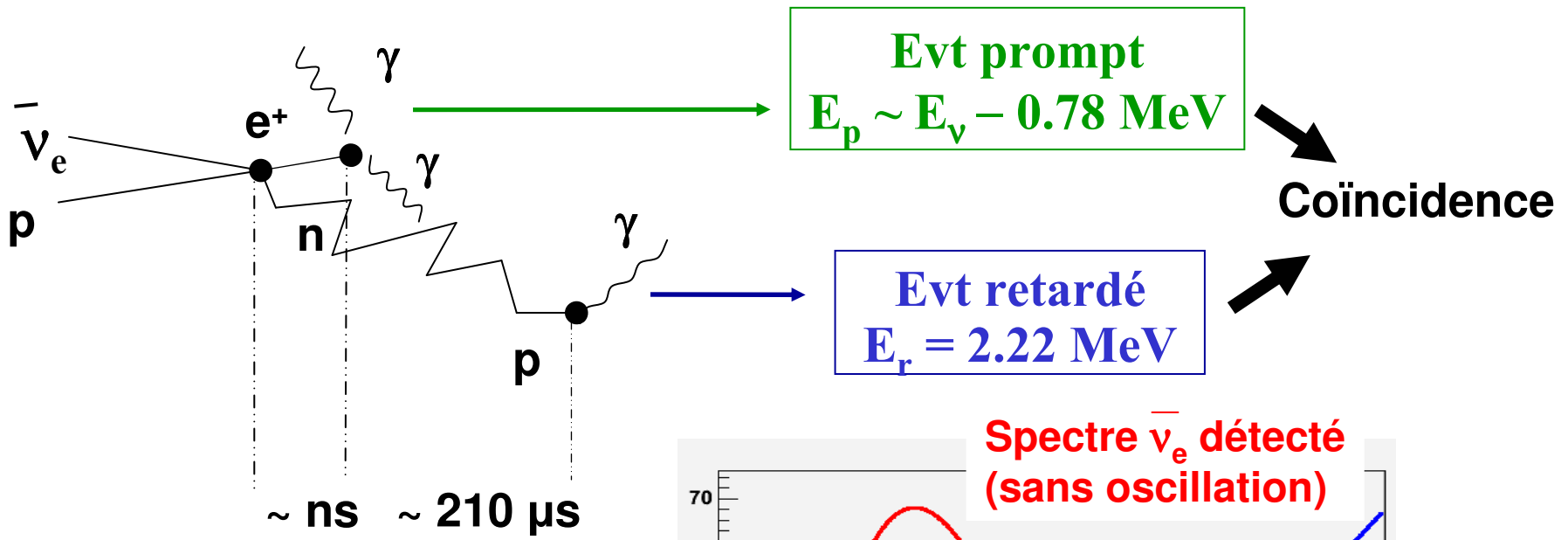
- 1325 PMs 17'' couverture photocathode 22%

- 554 PMs 20'' (opérationnels depuis Mars 2003) + 12% couverture photocathode

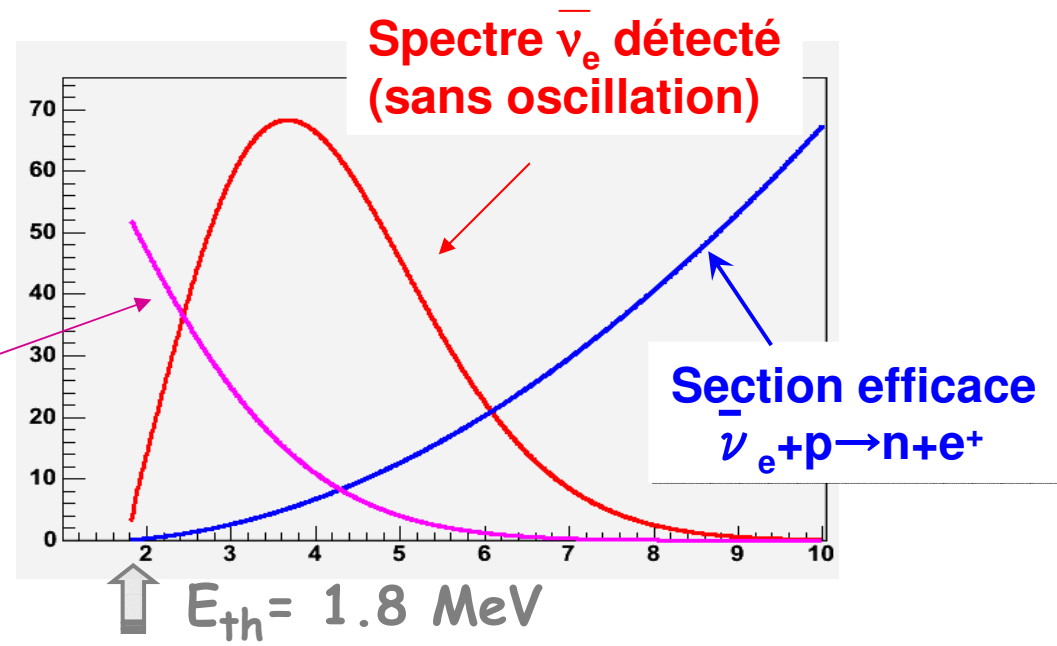
- Détecteur externe (eau) à effet Tcherenkov (OD)

Détection des anti-neutrinos

désintégration beta inverse : $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$



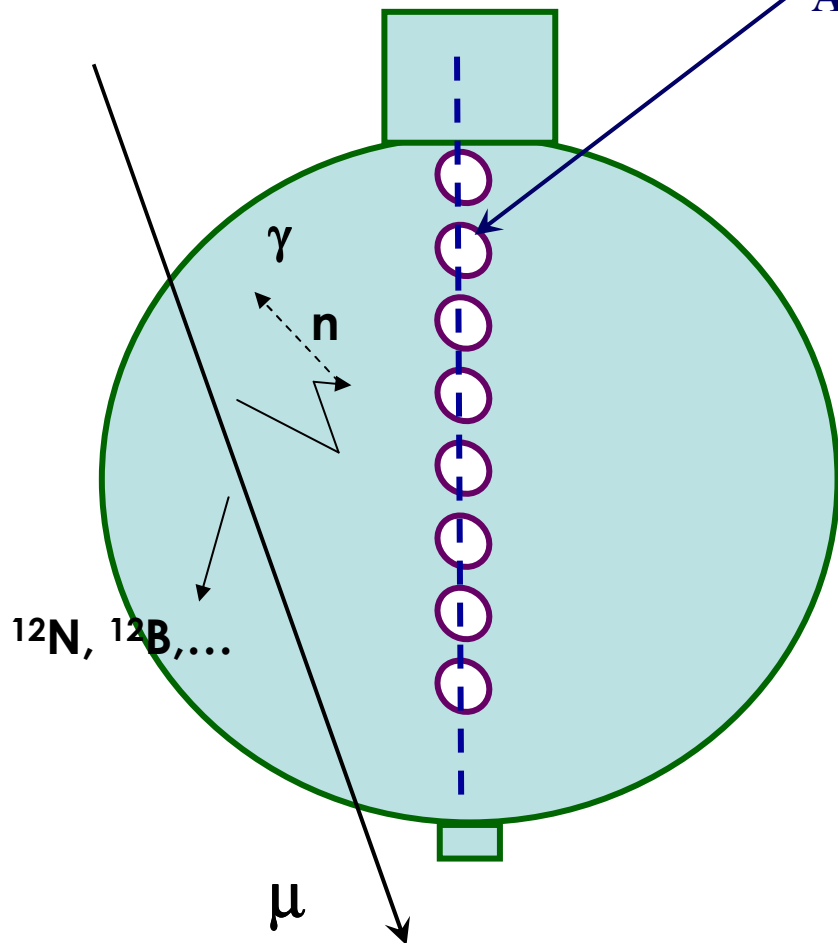
Spectre $\bar{\nu}_e$ réacteurs



Calibration

Sources radioactives, laser,
LEDs, μ cosmiques,
produits de spallation

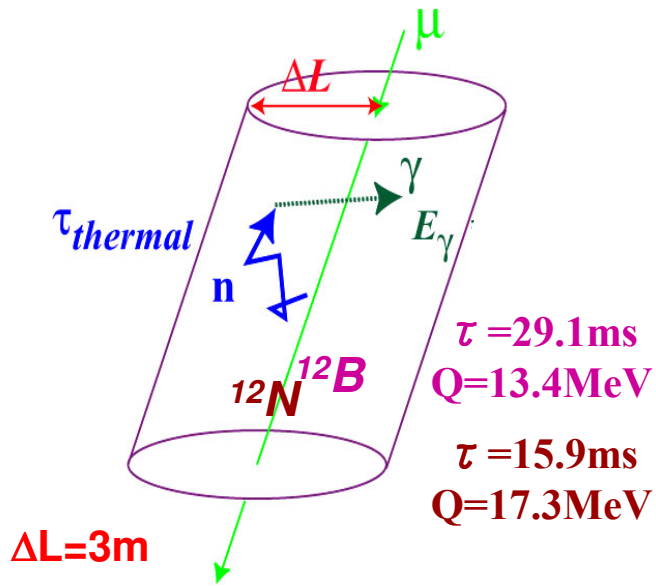
^{68}Ge : 1.012 MeV ($\gamma + \gamma$)
 ^{65}Zn : 1.116 MeV (γ)
 ^{60}Co : 2.506 MeV ($\gamma + \gamma$)
AmBe : 2.20, 4.40, 7.6 MeV (γ)



Calibration de l'énergie,
temps, mesure du
temps de capture n,
efficacités des triggers,
transport de la lumière

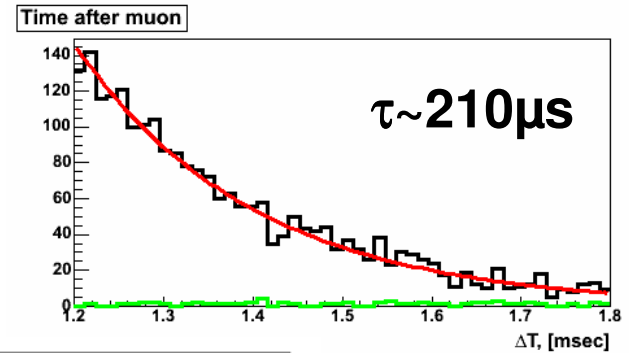
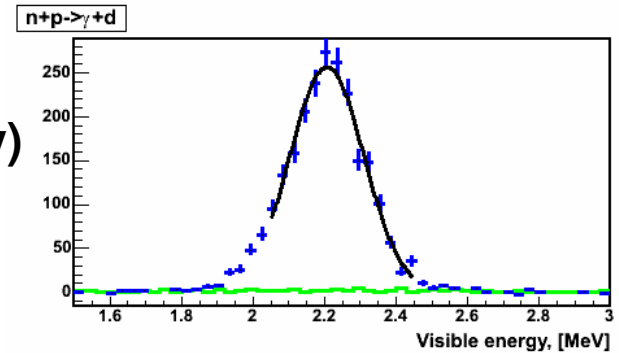
...

Produits de spallation n, ^{12}B

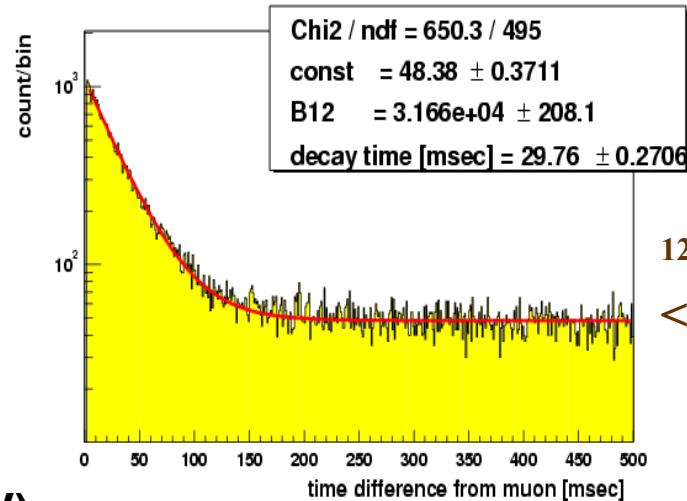
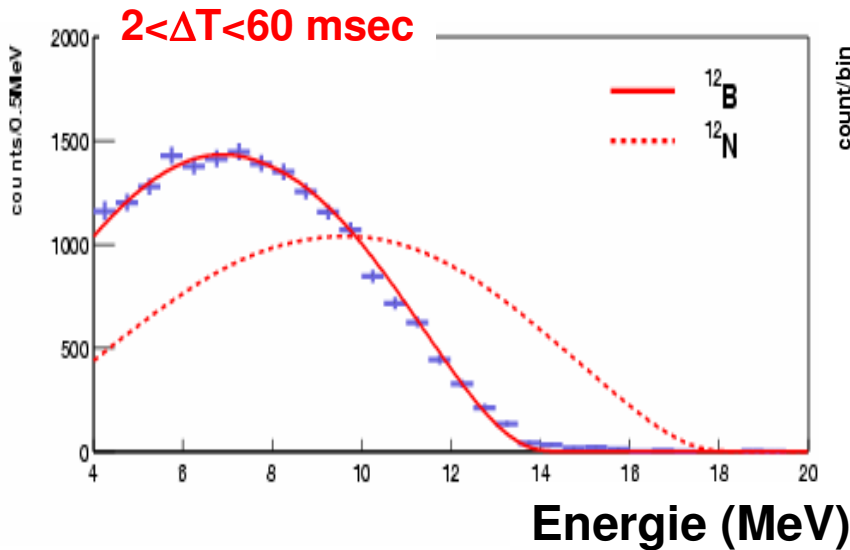


neutrons
(3000 / kton-day)

n et ^{12}B
 → calibration E
 → vol. fid.

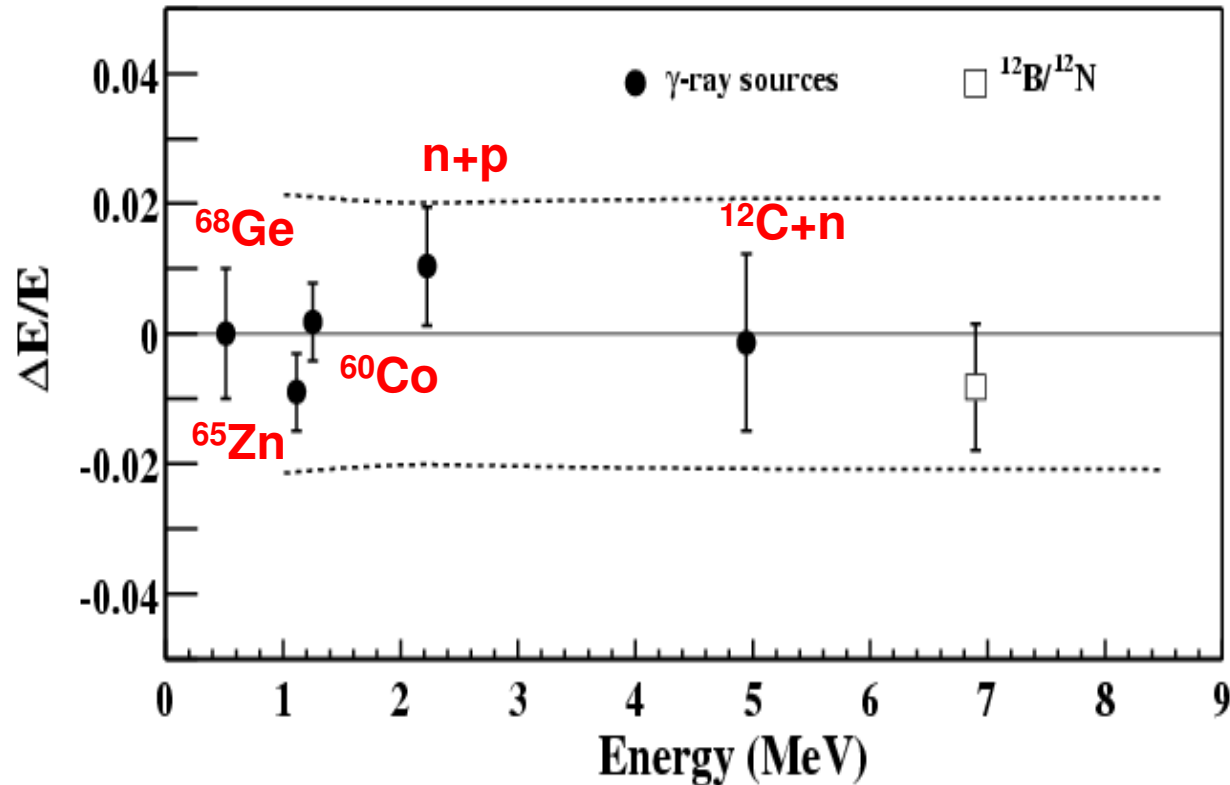


$^{12}\text{B}/^{12}\text{N}$ (60 / kton-day)



$^{12}\text{N} / (^{12}\text{B} + ^{12}\text{N})$
 < 0.011 at 95% C.L.

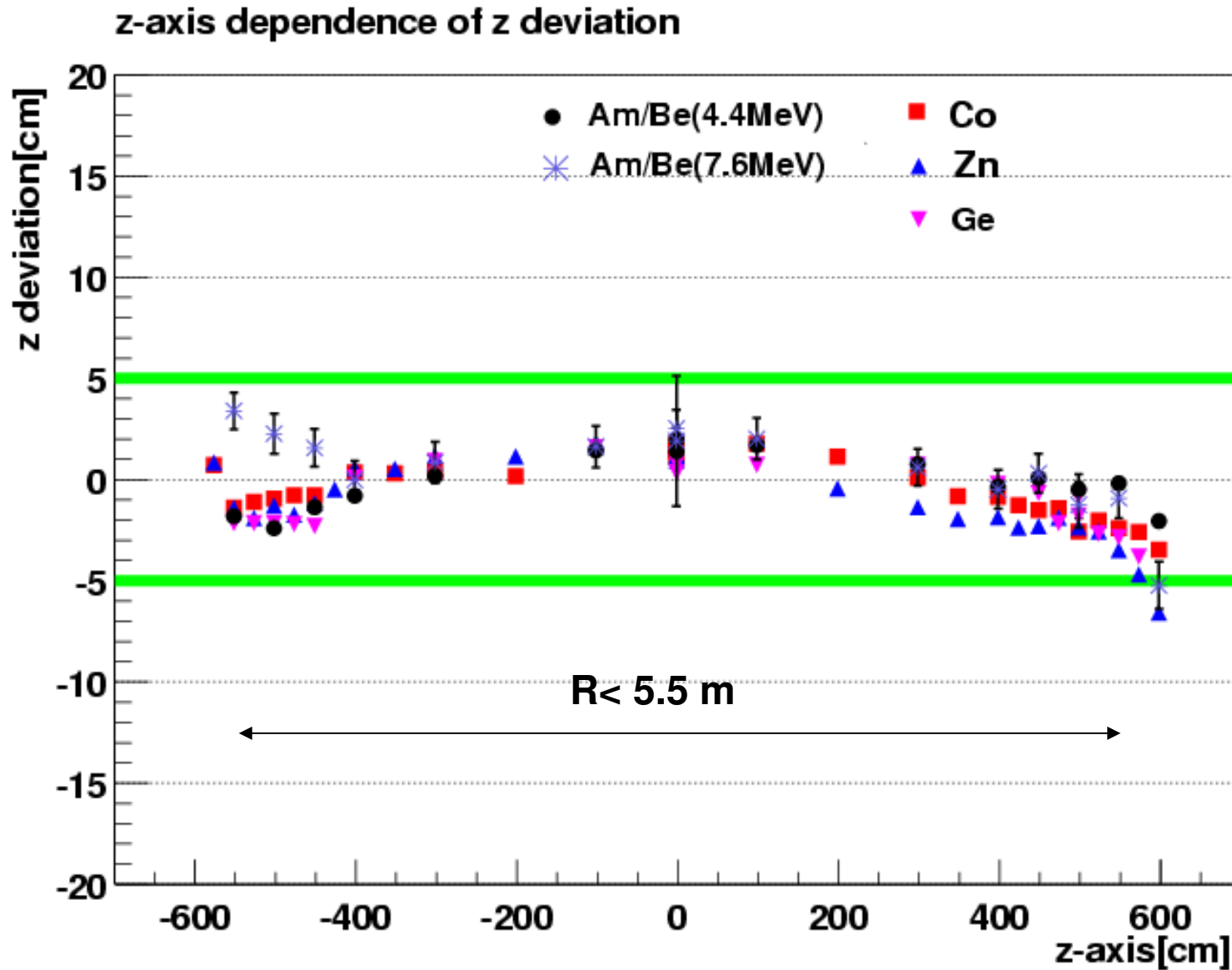
Calibration en énergie



- Correction de la charge des PMs (variation du gain, angle solide)
- Correction de la non linéarité (Tcherenkov, Birks quenching)

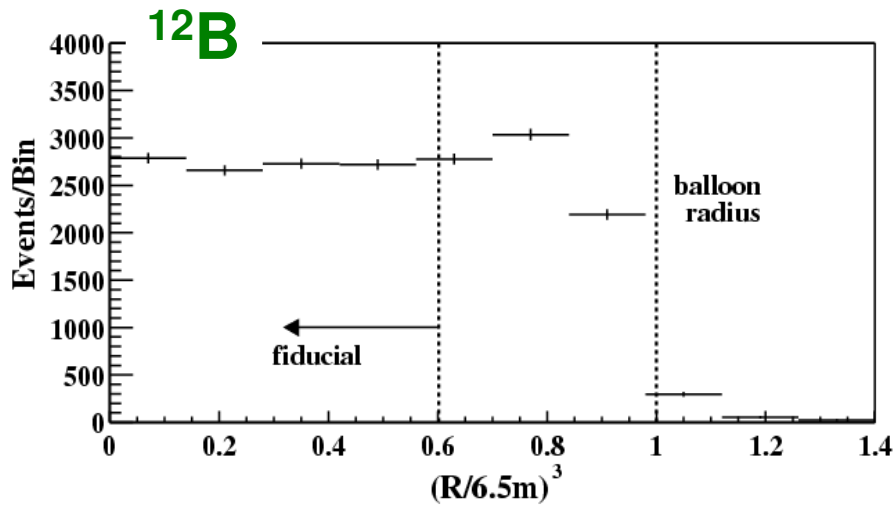
Résolution en énergie : $6.3\% / \sqrt{E}$ [MeV]

Calibrations des positions le long de Z

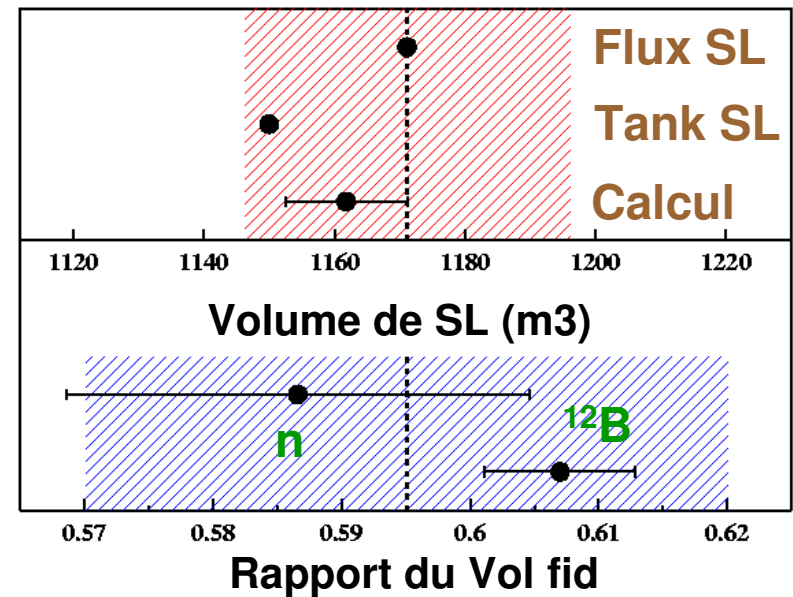


Volume fiduciel : $R < 5.5$ m

Distribution uniforme des produits spallation

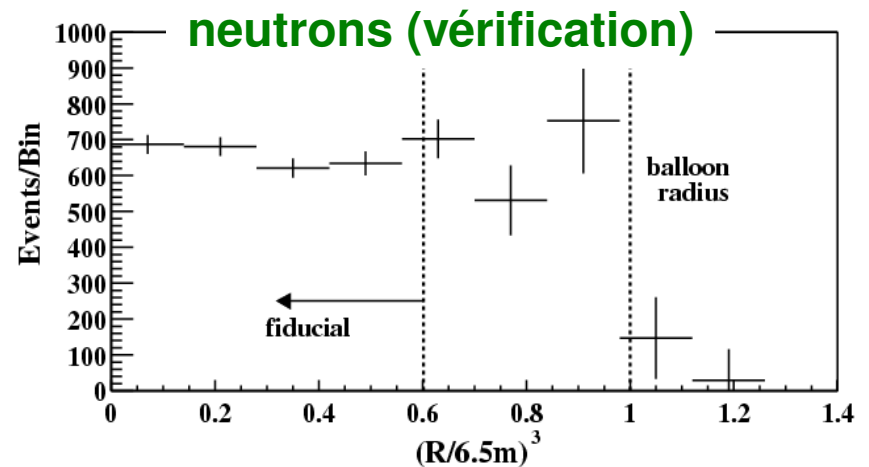


1171 ± 25 m³

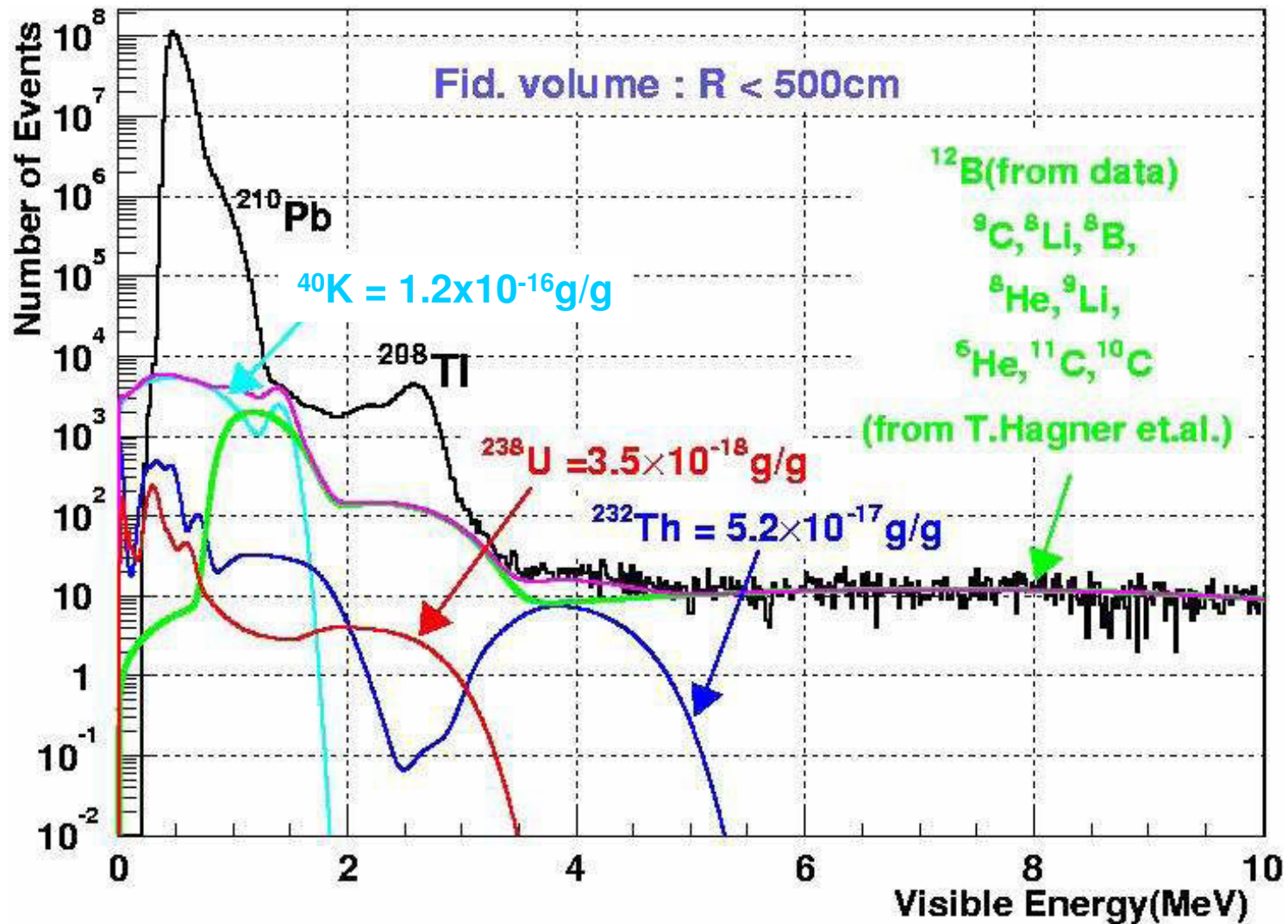


$$n_{\text{fiduciel}}/n_{\text{total}} = 0.607 \pm 0.006(\text{stat}) \pm 0.006(\text{syst})$$

Erreur systématique totale du
Volume Fiduciel : 4.7 %



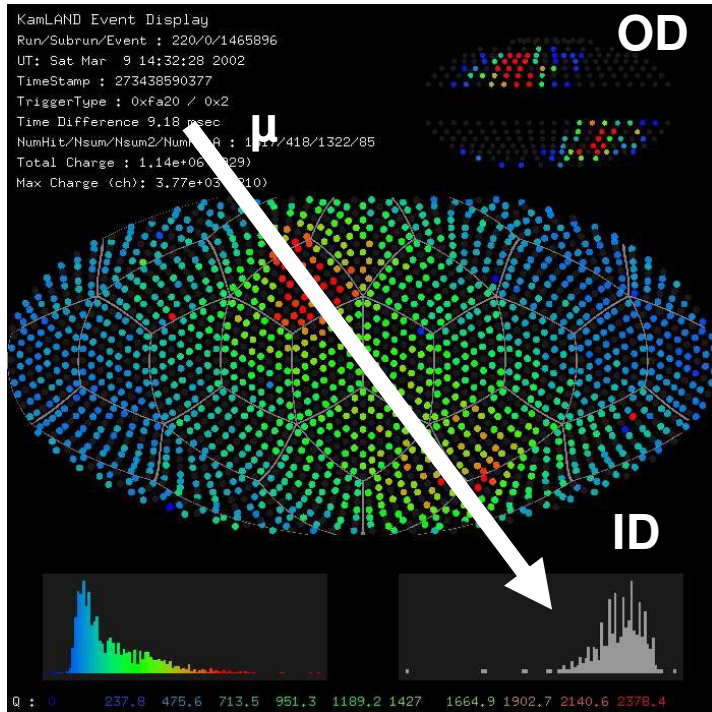
Bruit de fond



Bruit de fond non corrélé est supprimé par la détection en coincidence prompt-retardé

Muons

Taux de muons ~ 0.34 Hz



BF spallation corrélé

$$\tau(n) = 210 \mu\text{s}$$

$$\tau(^8\text{He}) = 171.7 \text{ ms}$$

$$\tau(^9\text{Li}) = 257.2 \text{ ms}$$

Veto

- **2 ms** veto sur tout le détecteur après **tous les muons**

(élimine efficacement n spallation)

- **2 sec** veto sur tout le détecteur pour **muons avec gerbe e.m**

$$(\Delta E = E_{\text{détectée}} - E_{\text{attendue}}(L_{\mu}) > 3 \text{ GeV})$$

- **2 sec** veto sur tout le détecteur pour **les muons mal reconstruits**

- **2 sec** veto pour le volume situé à **3m de la trace** pour les autres muons

Temps mort = 9.7%

Sélection des événements réacteurs

Coïncidence temporelle :

$$0.5 \mu\text{s} < \Delta T < 1000 \mu\text{s}$$

Coïncidence spatiale :

$$\Delta R < 2 \text{ m}$$

Volume fiduciel :

$$R_{\text{prompt, retardé}} < 5.5 \text{ m}$$

Energie capture neutron :

$$|E_{\text{retardé}} - 2.2\text{MeV}| < 0.4 \text{ MeV}$$

Energie positron :

$$2.6 \text{ MeV} < E_{\text{prompt}} < 8.5 \text{ MeV}$$

Géo-neutrinos veto

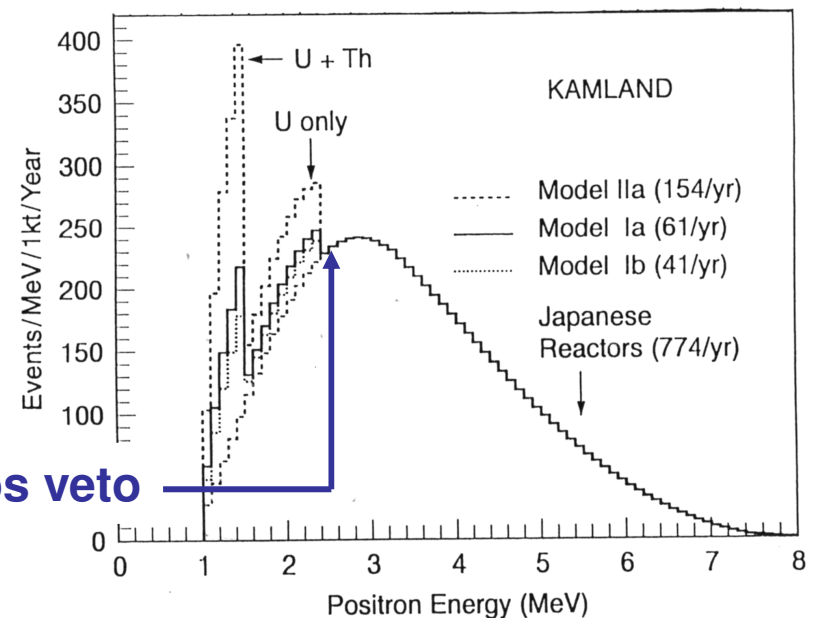
Efficacité : $89.8 \pm 1.5 \%$

2nd résultats

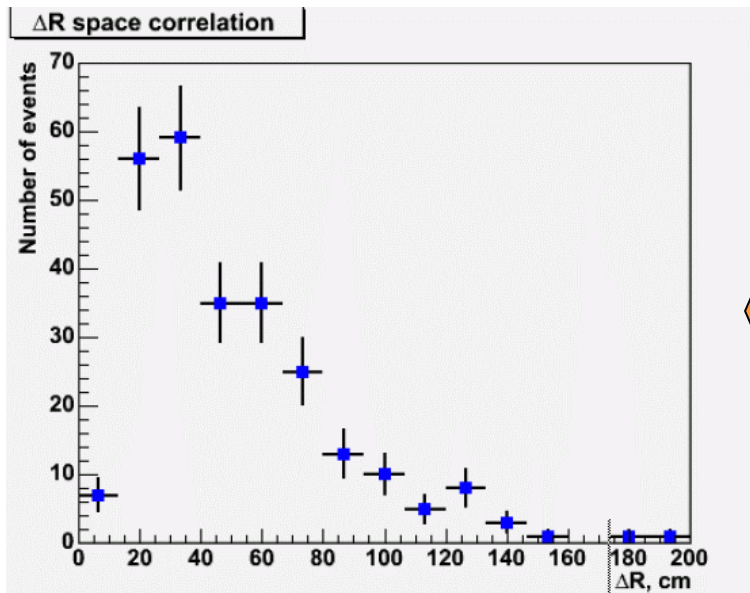
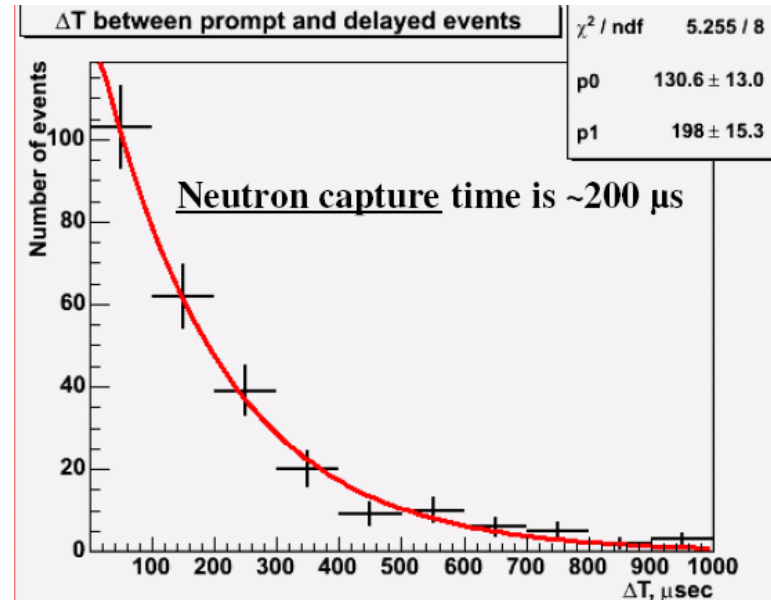
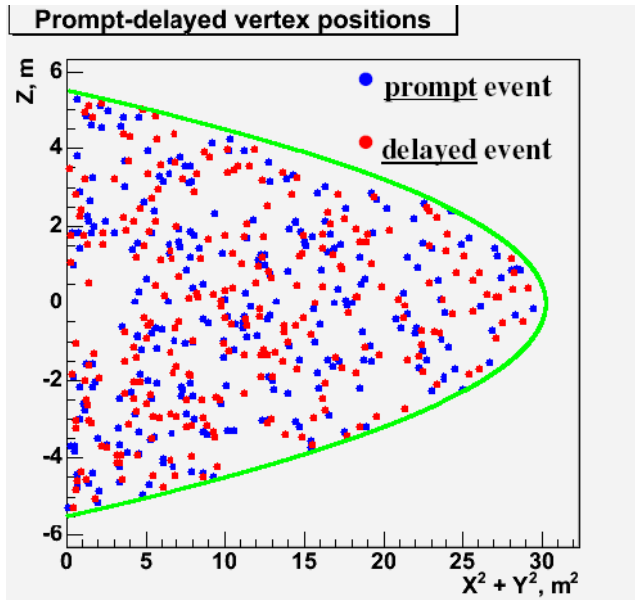
Mar. 9, 2002 – Jan. 11, 2004

Temps vie 515.1 jours

(1er résultats 145.4)



Distributions des evts prompt et retardé



Nette corrélation entre le signal du positron et celui du γ 2.2 MeV



Bruit de fond résiduel

Nb evts

- Accidentels : 2.69 ± 0.02
- $^8\text{He}, ^9\text{Li}$: 4.8 ± 0.9
- n spallation isolé < 0.89
- $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$: 10.3 ± 7.1

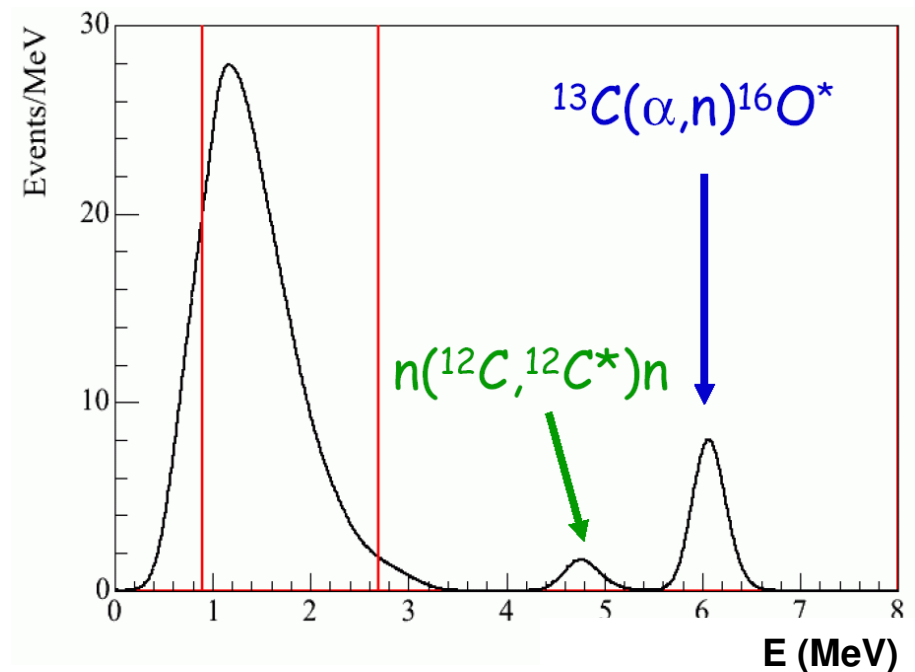
Total : 17.8 ± 7.3

BF (α, n)

^{210}Po (5.3 MeV α): > 99% α

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$: > 99% (α, n)

(Section efficace Sekharan et al)



Taux d'événements

➤ $N_{\text{attendus}} = 365 \pm 23.7 \text{ (syst)}$

➤ $N_{\text{BF}} = 17.8 \pm 7.3$

➤ $N_{\text{observés}} = 258$

$$\frac{\text{Nobs} - \text{NBF}}{\text{Natt}} = 0.658 \pm 0.044 \text{ (stat)} \pm 0.047 \text{ (syst)}$$

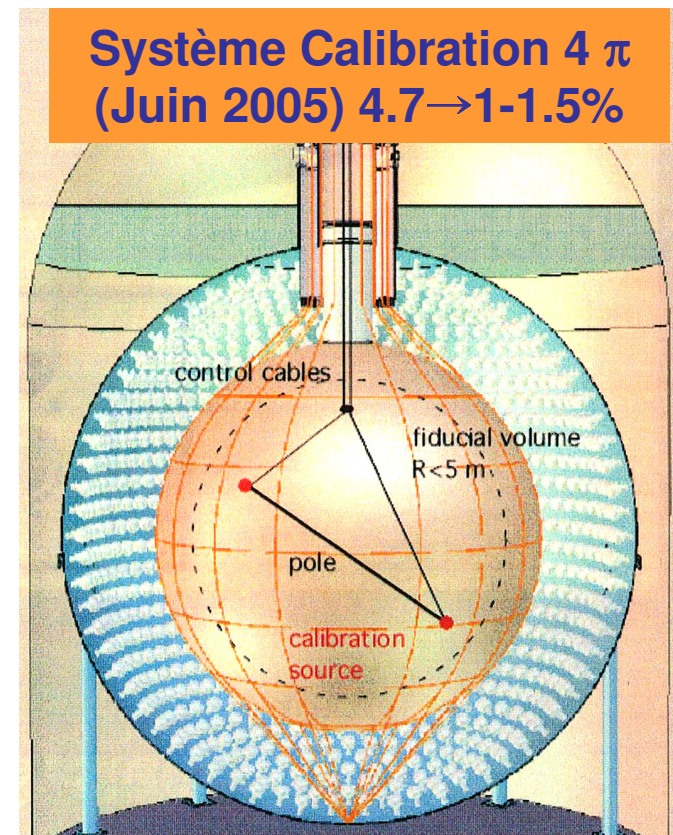
Données 1er résultats : $0.601 \pm 0.069(\text{stat}) \pm 0.042(\text{syst})$ [nouvelle analyse]
en accord avec $0.589 \pm 0.085(\text{stat}) \pm 0.042(\text{syst})$ [ancienne + BF (α, n)]

Disparition $\bar{\nu}_e$ confirmée à 99.998% CL

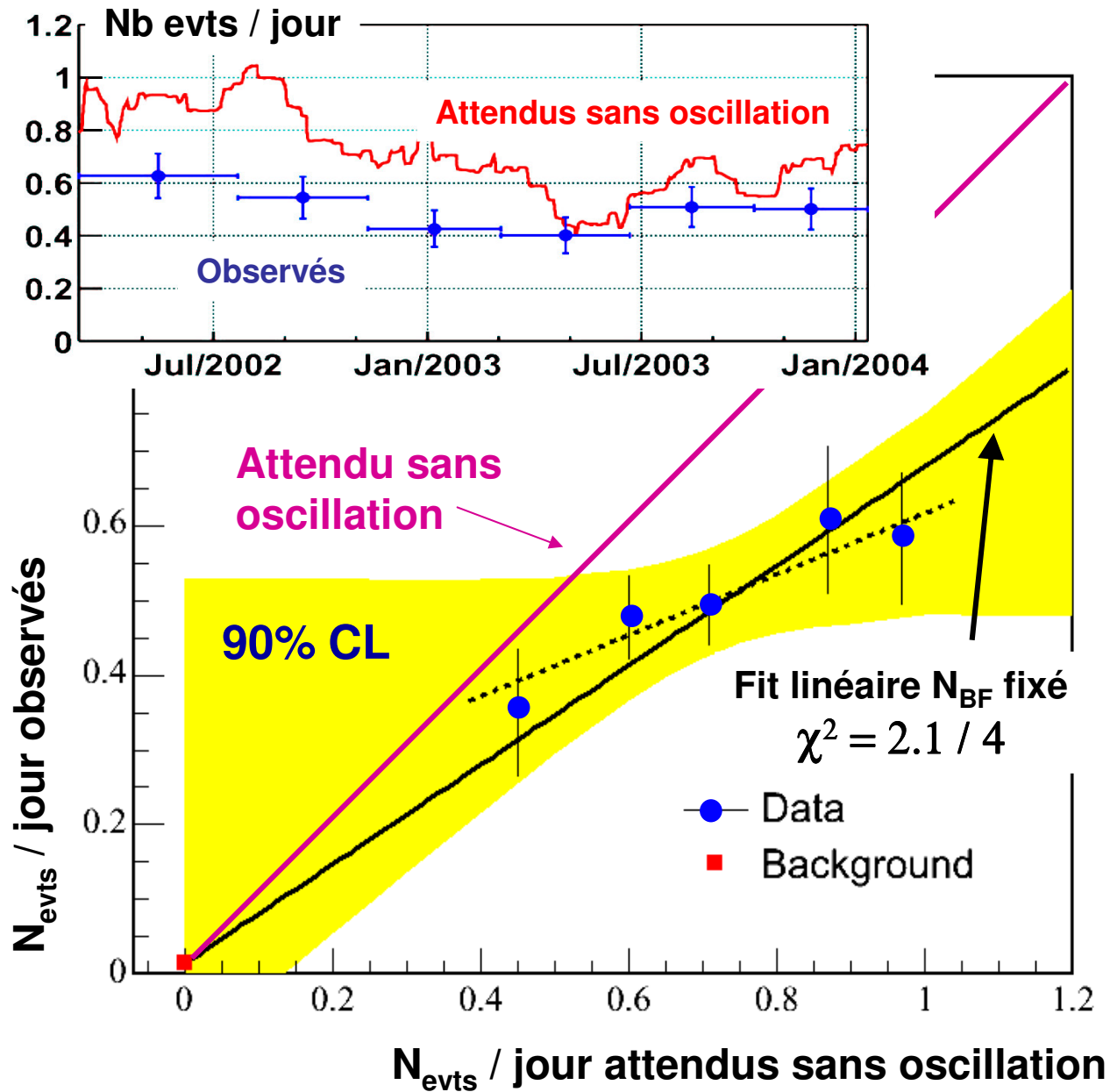
Erreurs systématiques

Systematic	%
Volume fiduciel	4.7
Seuil énergie	2.3
Efficacités coupures	1.6
Temps vie	0.06
$P_{\text{thermique}}$ réacteurs	2.1
Composition carburant	1.0
Spectre antineutrinos	2.5
Section efficace	0.2
Total	6.5

Erreur dominante



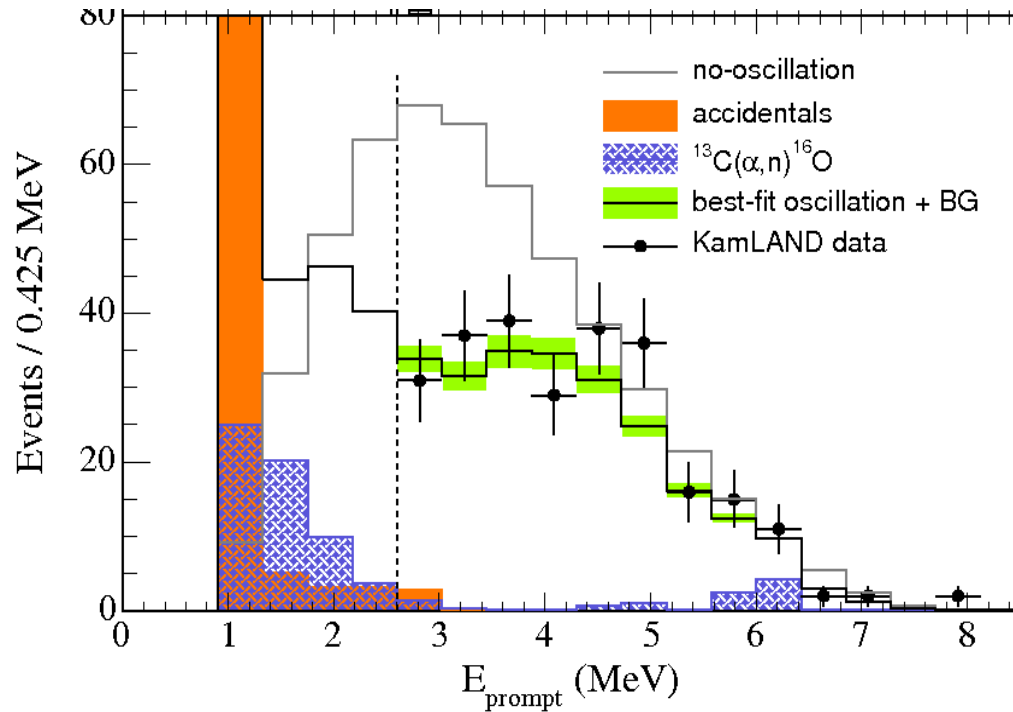
Taux vs. flux



**Corrélation
signal avec flux
réacteurs**

**Données ne peuvent
confirmer ou exclure la
possibilité d'un géo-
réacteur (fit \rightarrow 40 TW)**

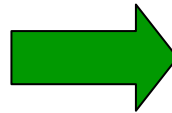
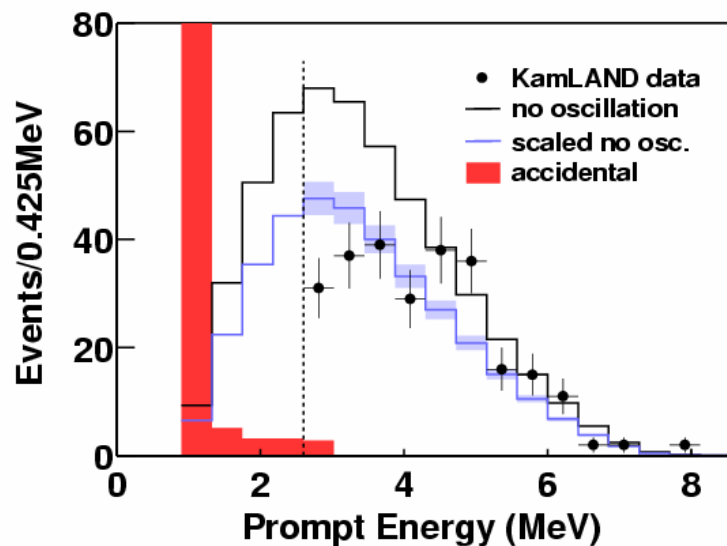
Analyse du spectre



Résultat Fit
(unbinned likelihood)

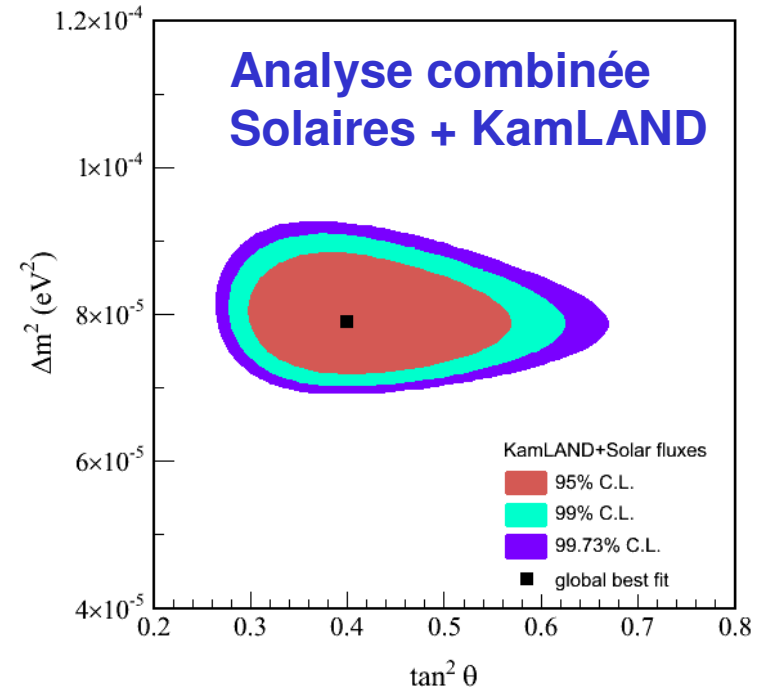
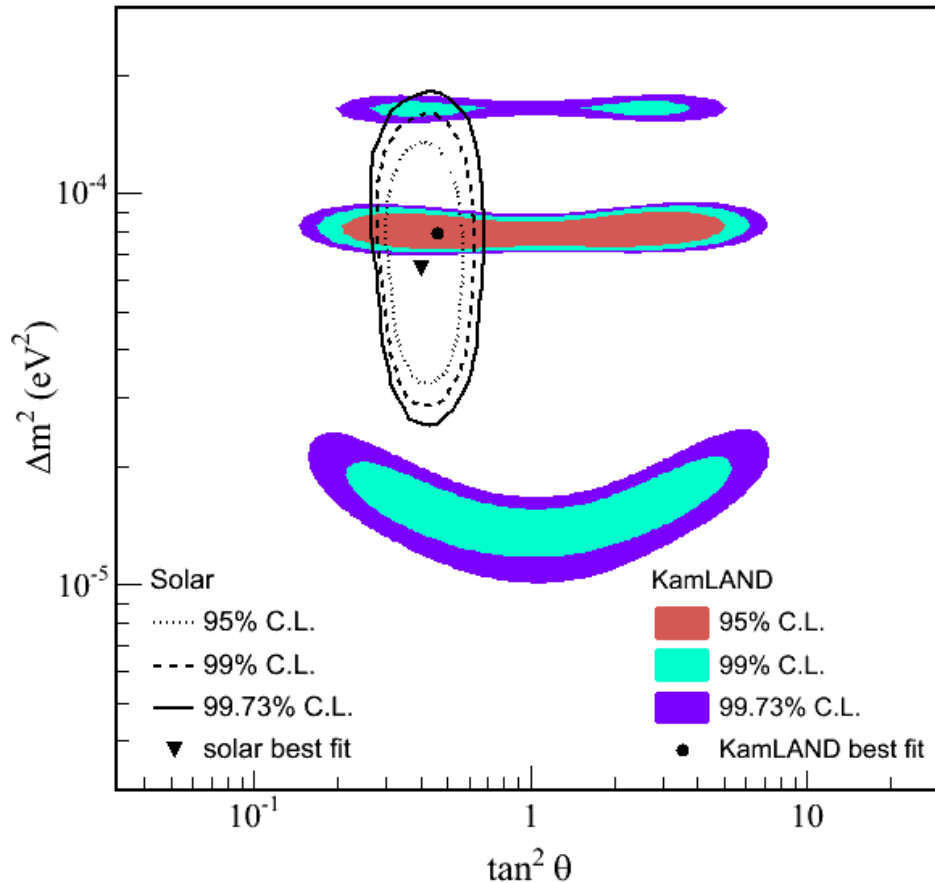
$$\Delta m^2 = 7.9^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta = 0.46$$



Distorsion
spectrale à
99.6 % CL

Région permise pour les paramètres d'oscillation



Analyse combinée :

$$\Delta m^2 = 7.9^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \theta = 0.40^{+0.10}_{-0.07}$$

Futurs résultats

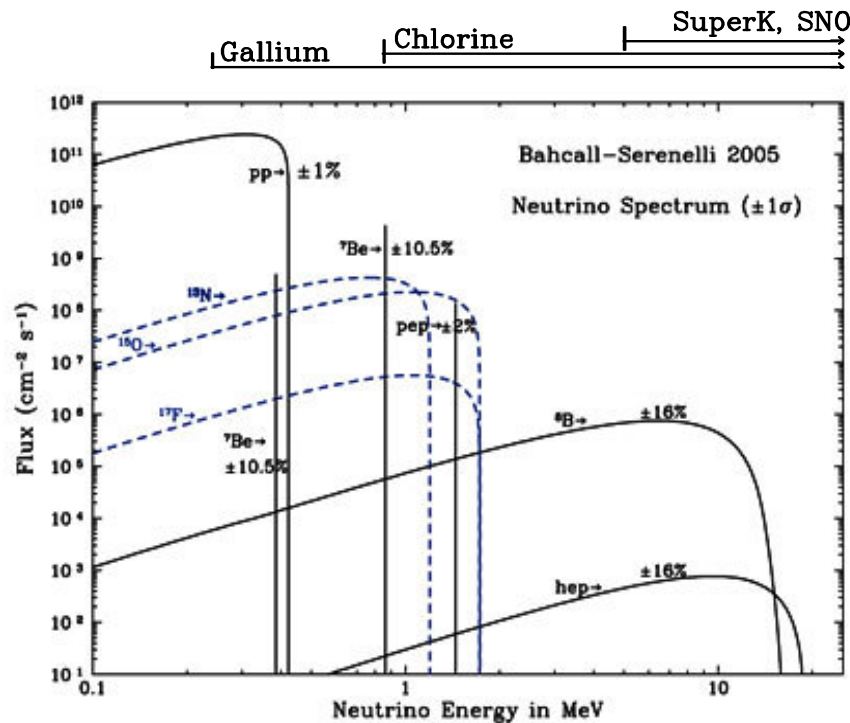
➤ Réacteurs

- Analyse du taux d'événements et de l'angle de mélange sont maintenant limitées par les systématiques
→ système calibration 4π
- Résolution Δm^2 provient de la distorsion du spectre
→ plus de statistique
- Shika2 démarre en 2006 à 88 km, près du premier minimum d'oscillation, plus grande suppression du taux d'événements pour ces neutrinos

➤ Autre physique

- Géoneutrinos
- Désintégration des nucléons
- Détection de supernova
- **Neutrinos solaires**

Phase neutrinos solaires



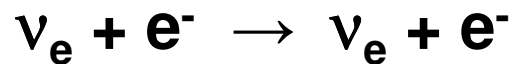
Neutrinos solaires ${}^7\text{Be}$:

- Aucune mesure en temps réel
- Incertitude expérimentale de 40% sur le flux
- 10% → améliore précision facteur 4 sur ${}^7\text{Be}$, 2.5 sur pp

Affiner compréhension du soleil

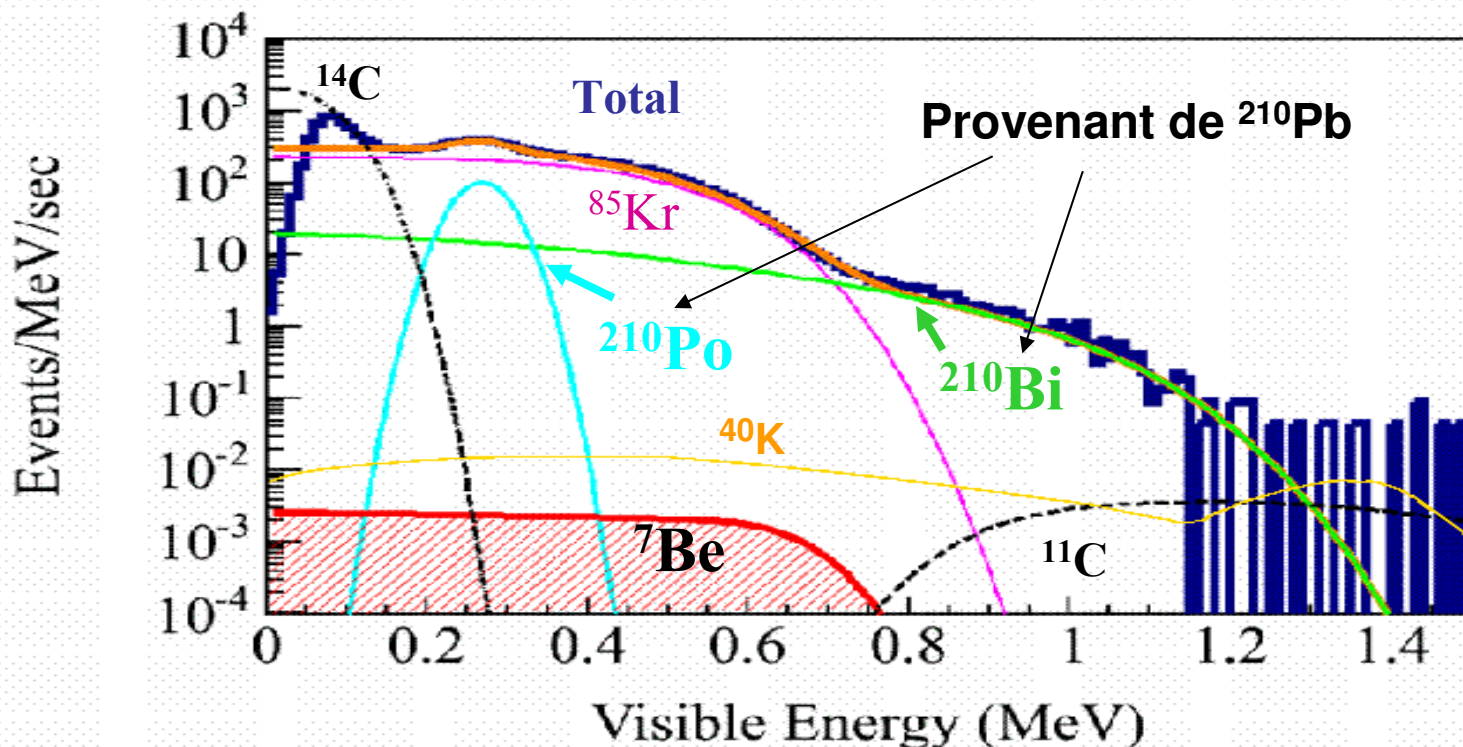
Peu de retombée sur les paramètres d'oscillation

Détection



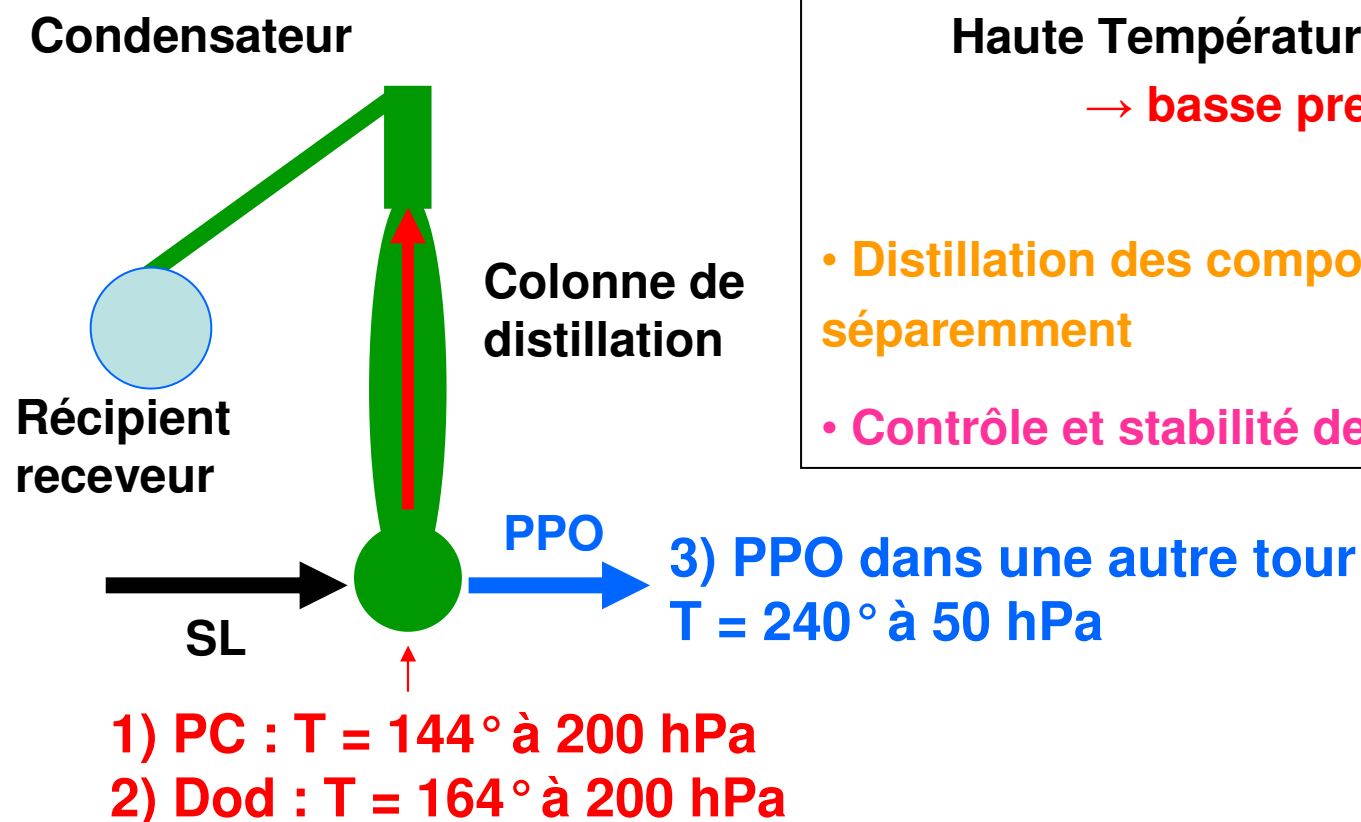
**Pas de coïncidence
→ nécessite une intense purification du BF basse E**

Bruit de fond basse énergie



Bruit de fond	Contamination	Réduction	Purification
²³⁸ U	3.5x10 ⁻¹⁸ g/g	OK	
²³² Th	5.2x10 ⁻¹⁷ g/g	OK	
⁸⁵ Kr	0.7 Bq / m ³	10 ⁻⁶	Distillation + tour purge
⁴⁰ K	1.9x10 ⁻¹⁶ g/g	0.03	Distillation
²¹⁰ Pb	~ 10 ⁻²⁰ g/g	10 ⁻⁵	Distillation + prévention Rn

Principe de la distillation



- Petit appareillage de pré-tests : compréhension du procédé, propriétés optiques du SL, mesures préliminaires des efficacités
- Gros appareillage de test : mesure des efficacités

Propriété du SL après distillation

SL (PC + Dod + PPO) après **distillation individuelle** présente les **même propriétés** qu'avant distillation

➤ Longueur d'atténuation L (m)

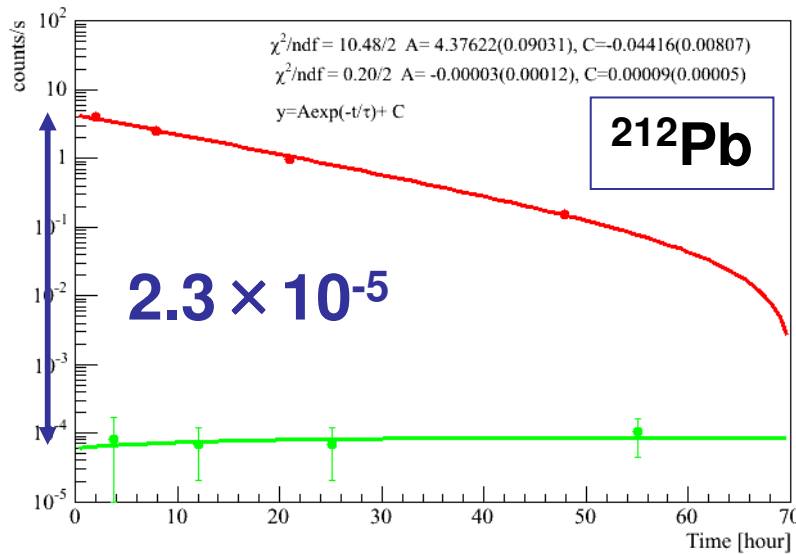
SL	L(365 nm)	L(436 nm)
Origine	1.4 ± 0.5	12.7 ± 0.4
Distillé	1.0 ± 0.3	11.2 ± 0.4

➤ Quantité de lumière (charge ADC Q - source ^{137}Cs)

SL	Q[ch]
Origine	1392 ± 4
Distillé	1401 ± 7

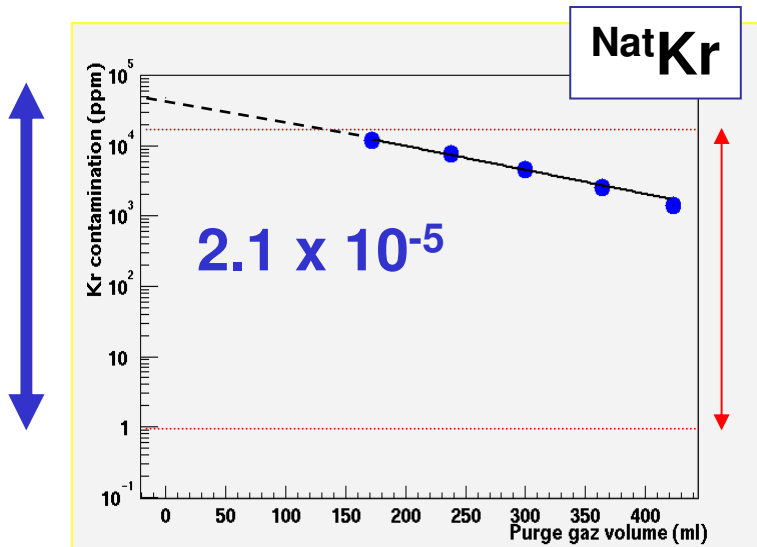
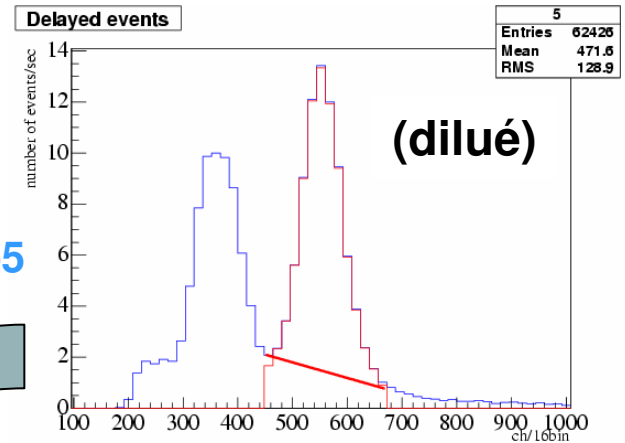
Efficacité de la distillation

Résultats préliminaires (sans PPO)

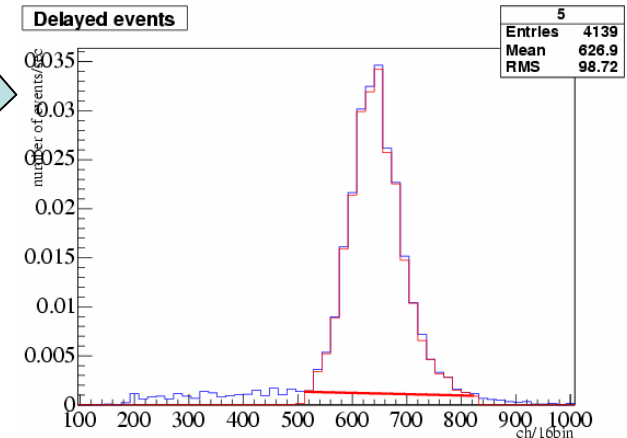


^{222}Rn

2.5×10^{-5}



Fenêtre de détection du chromatographe



- 1 seule distillation
→ résultats très encourageants
- PPO ?

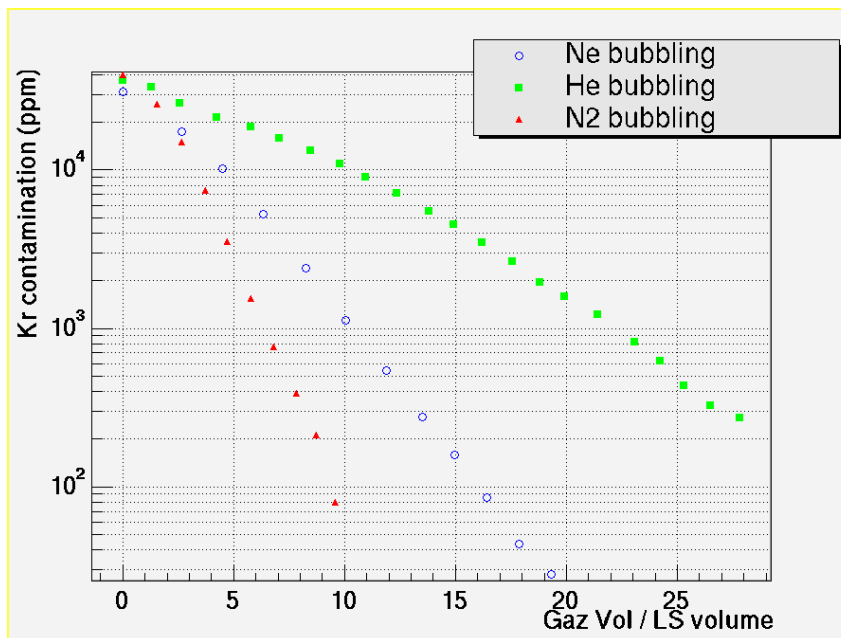
Purge des gaz nobles

Quel gaz utiliser ?

Résultats obtenus
par bubbling



- Différentes taille de bulles (trous 1mm – 10 μ m)
- Différentes géométries
- Différents flux

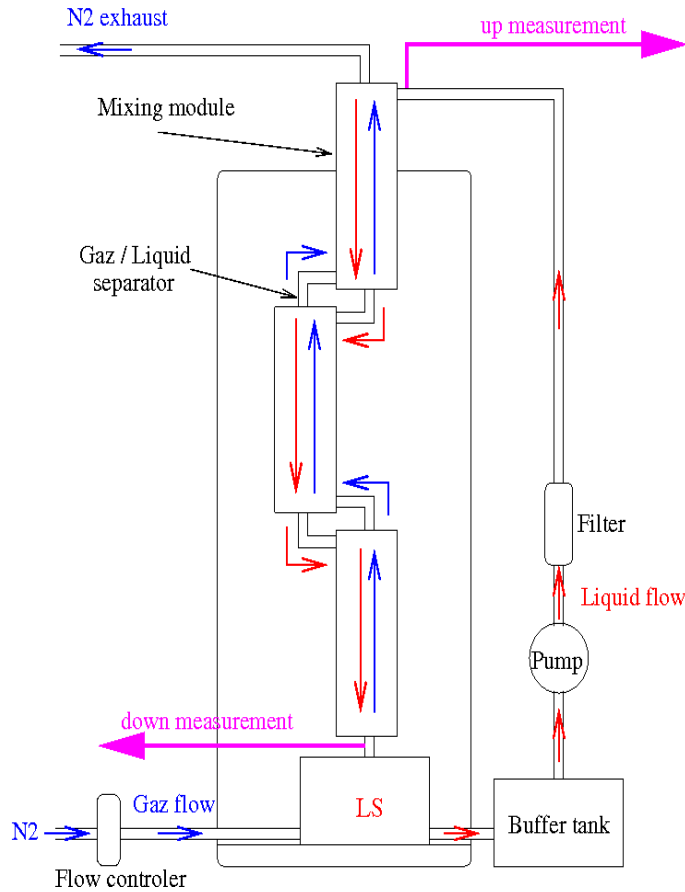


- N₂ ~ 2 fois plus efficace que Ne (tests effectués sur Kr, Ar, Xe)
- He dangereux pour PMT

➔ N₂

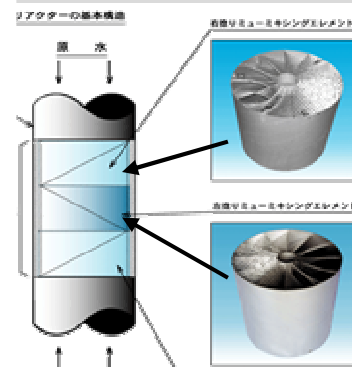
Tour de purge des gaz nobles

Tour de tests



En fin de chaîne pour éliminer les émanations externes (Kr, Rn)

1 module

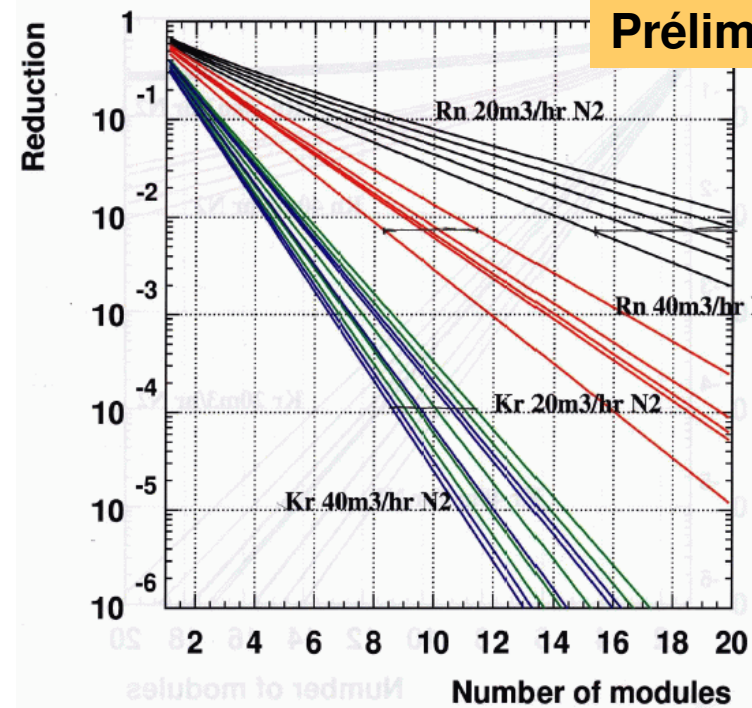


Sens droit

Plateaux perforés
agencés en pas de vis

Sens gauche

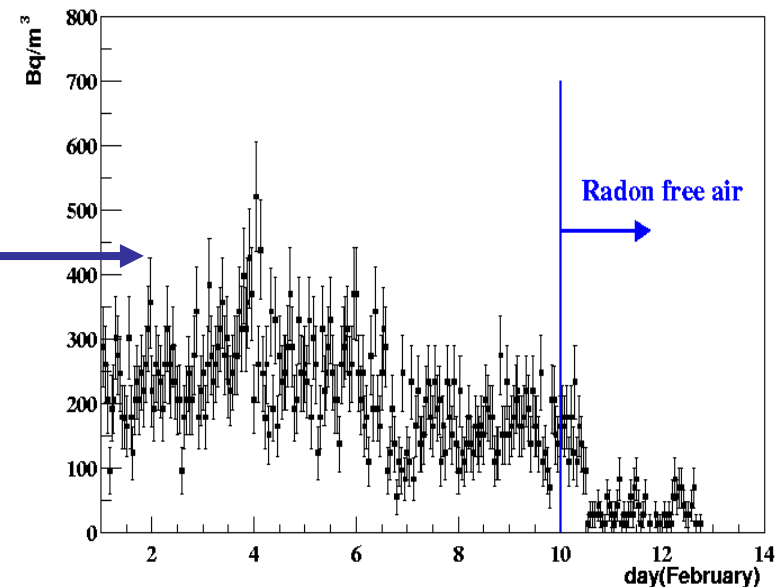
Rn, Kr reduction at 0.4 atm, 26 degree



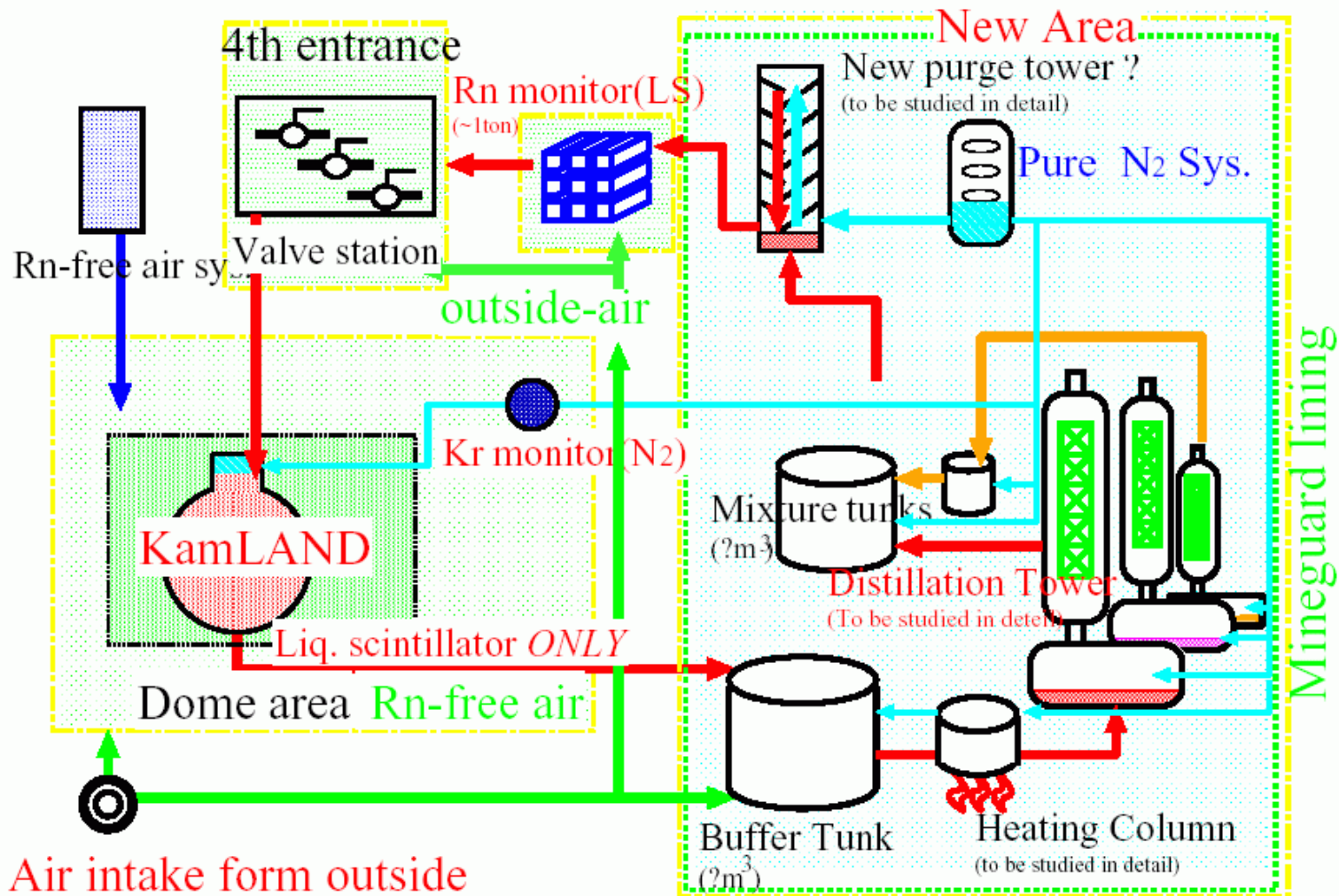
Systeme final de purification

- **LS : 2 m³ / h**
 - **Distillation** pour éliminer ²¹⁰Pb (+ ⁴⁰K, ³⁹Ar, ⁸⁵Kr, ²²²Rn)
 - 2 ou 3 tours (PC – Dod, PPO)
 - **Chauffage** (efficacité purification Pb x 3 – 5) ⇒ 10⁻⁵ réalisable
 - **Absorption ?** Réduction ~ 50% mais indépendante de distillation
 - **N₂ purge** pour éliminer gaz nobles (⁸⁵Kr, ³⁹Ar, ²²²Rn) : 40 m³ / h
- Nouveaux modules en cours de construction → évaluer le nombre final nécessaire

- **Prévention contre émanations externes (²²²Rn)**
 - **Systeme de ventilation :**
3000 Bq/m³ (été) → 40 Bq/m³
 - **Protection étanche des valves**
→ réduction 1/200



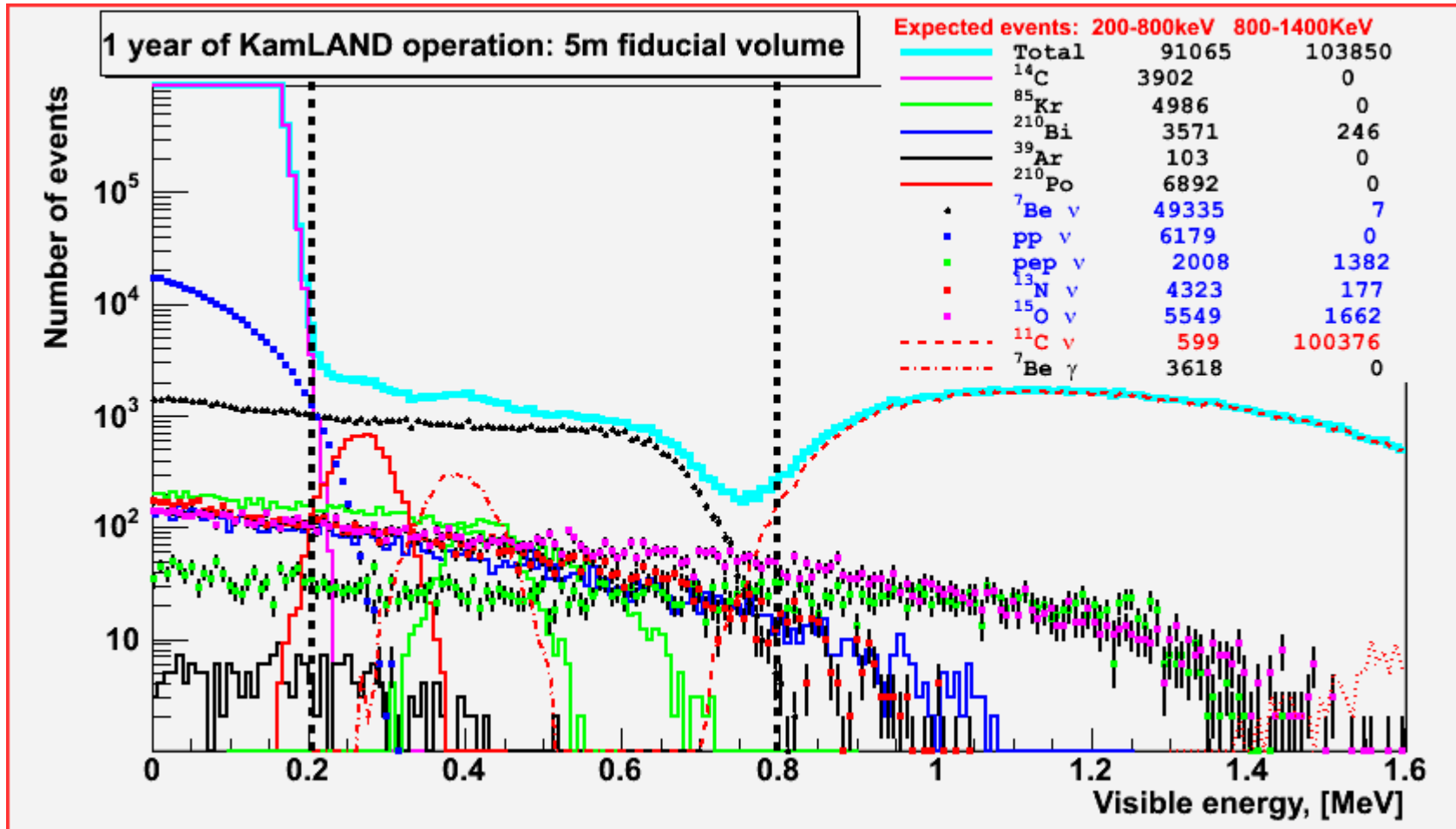
Systeme final de purification



Résultats attendus

Facteurs réduction

$^{210}\text{Pb} : 10^{-5}$
 $^{39}\text{Ar}, ^{85}\text{Kr} : 10^{-6}$



Précision flux ν $^7\text{Be} : 5 \%$

Résumé

Les résultats de KamLAND montrent une disparition des antineutrinos réacteurs à 99.998% CL et une distorsion spectrale à 99.6% CL

On est entré depuis peu dans une ère de mesure de précision des paramètres d'oscillation

LMA → 1 valeur des paramètres

Les résultats réacteurs vont continuer à s'améliorer

Les premiers résultats des tests de purification en vue de la phase solaire, sont très encourageants.

Les specifications sont atteignables et permettront une mesure du flux des ν_e 7Be avec une précision de 5-10%