



Mesure des neutrinos solaires de la raie du béryllium dans l'expérience Borexino :

analyse des données issues du prototype CTF après conception et validation du système de numérisation rapide

Tristan BEAU

Directeur de thèse : Hervé de KERRET

Laboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie

Collège de France

Plan de l'exposé

Plan de l'exposé

① Cadre des neutrinos solaires

Plan de l'exposé

① Cadre des neutrinos solaires

- ① Production de neutrinos dans le Soleil, mesure du flux sur Terre
- ② Phénomène d'oscillation
- ③ Où en est-on aujourd'hui ?

Plan de l'exposé

① Cadre des neutrinos solaires

- ① Production de neutrinos dans le Soleil, mesure du flux sur Terre
- ② Phénomène d'oscillation
- ③ Où en est-on aujourd'hui ?

② Borexino et le prototype CTF (*Counting Test Facility*)

Plan de l'exposé

① Cadre des neutrinos solaires

- ① Production de neutrinos dans le Soleil, mesure du flux sur Terre
- ② Phénomène d'oscillation
- ③ Où en est-on aujourd'hui ?

② Borexino et le prototype CTF (*Counting Test Facility*)

- ① Présentation de Borexino
- ② La radiopureté
- ③ Acquisition des données, le FADC

Plan de l'exposé

① Cadre des neutrinos solaires

- ① Production de neutrinos dans le Soleil, mesure du flux sur Terre
- ② Phénomène d'oscillation
- ③ Où en est-on aujourd'hui ?

② Borexino et le prototype CTF (*Counting Test Facility*)

- ① Présentation de Borexino
- ② La radiopureté
- ③ Acquisition des données, le FADC

③ Résultats sur le CTF

Plan de l'exposé

① Cadre des neutrinos solaires

- ① Production de neutrinos dans le Soleil, mesure du flux sur Terre
- ② Phénomène d'oscillation
- ③ Où en est-on aujourd'hui ?

② Borexino et le prototype CTF (*Counting Test Facility*)

- ① Présentation de Borexino
- ② La radiopureté
- ③ Acquisition des données, le FADC

③ Résultats sur le CTF

- ① Test du FADC
- ② Mesure des niveaux de radioactivité
- ③ Discrimination
- ④ Analyse post-impulsion

Plan de l'exposé

① Cadre des neutrinos solaires

- ① Production de neutrinos dans le Soleil, mesure du flux sur Terre
- ② Phénomène d'oscillation
- ③ Où en est-on aujourd'hui ?

② Borexino et le prototype CTF (*Counting Test Facility*)

- ① Présentation de Borexino
- ② La radiopureté
- ③ Acquisition des données, le FADC

③ Résultats sur le CTF

- ① Test du FADC
- ② Mesure des niveaux de radioactivité
- ③ Discrimination
- ④ Analyse post-impulsion

④ Conclusions

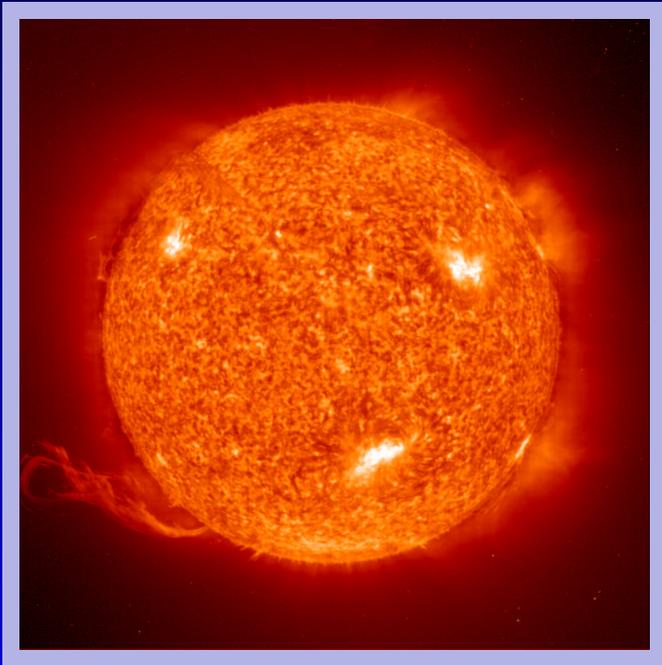
1

Cadre des neutrinos solaires

Neutrinos solaires : production

Le Soleil est essentiellement constitué :

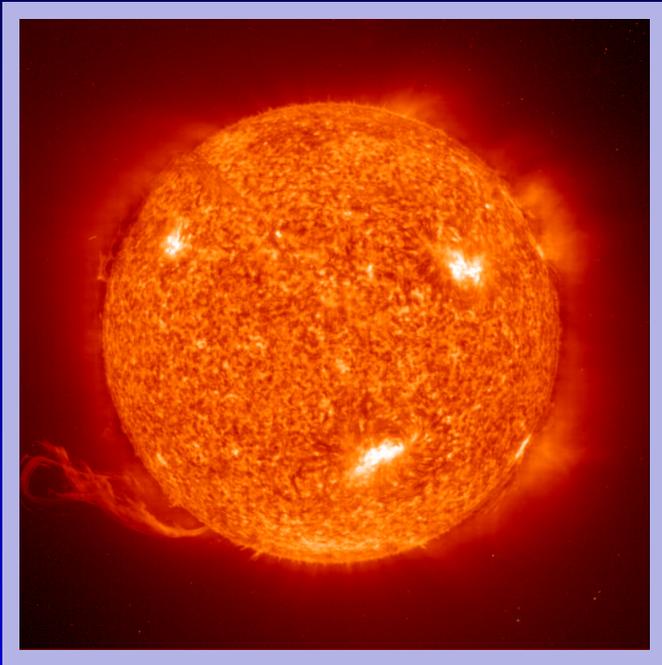
- d'hydrogène (*i.e.* protons), 75% en masse
- d'hélium, 25% en masse



Neutrinos solaires : production

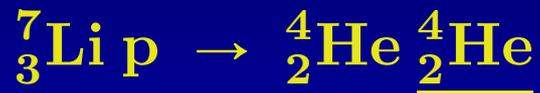
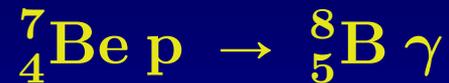
Le Soleil est essentiellement constitué :

- d'hydrogène (*i.e.* protons), 75% en masse
- d'hélium, 25% en masse



La température au centre du Soleil (environ $15 \cdot 10^6$ K) est suffisante pour initier les réactions de fusions nucléaires.

Neutrinos solaires : production

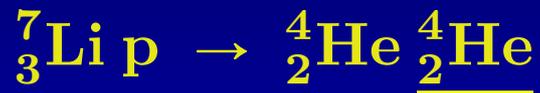


(PP-II)



(PP-III)

Neutrinos solaires : production

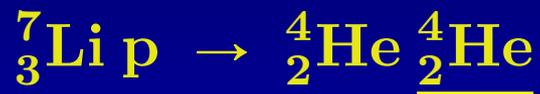


(PP-II)



(PP-III)

Neutrinos solaires : production

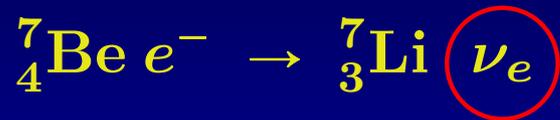


(PP-II)



(PP-III)

Neutrinos solaires : production



(PP-II)



(PP-III)

Neutrinos solaires : production



(PP-II)



(PP-III)

Neutrinos solaires : production



(PP-II)



(PP-III)

Neutrinos solaires : production



(PP-II)



(PP-III)

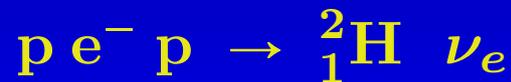
Neutrinos solaires : production



(PP-II)



(PP-III)



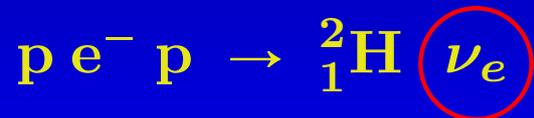
Neutrinos solaires : production



(PP-II)



(PP-III)



Neutrinos solaires : production

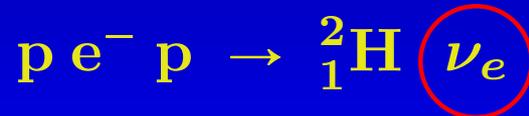


(PP-II)



(PP-III)

neutrino PEP ν_{PEP}



Neutrinos solaires : production

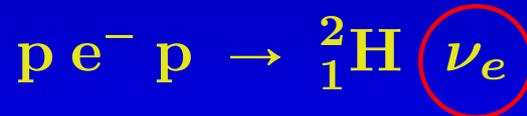


(PP-II)

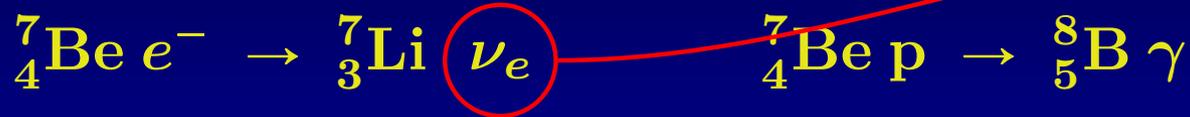


(PP-III)

neutrino PEP ν_{PEP}



Neutrinos solaires : production

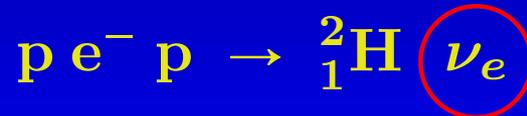


(PP-II)



(PP-III)

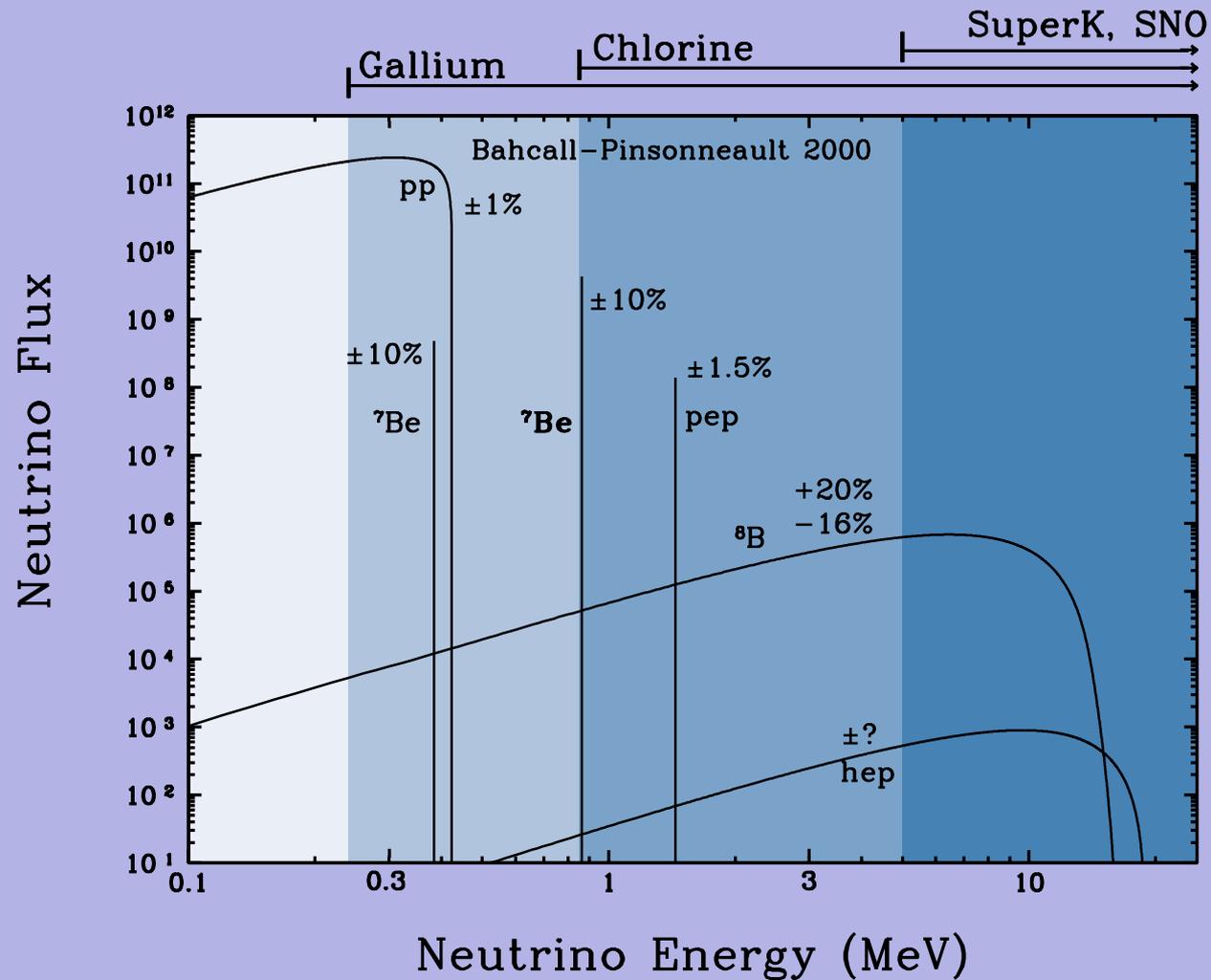
neutrino PEP ν_{PEP}



neutrino HEP ν_{HEP}



Spectre des neutrinos solaires

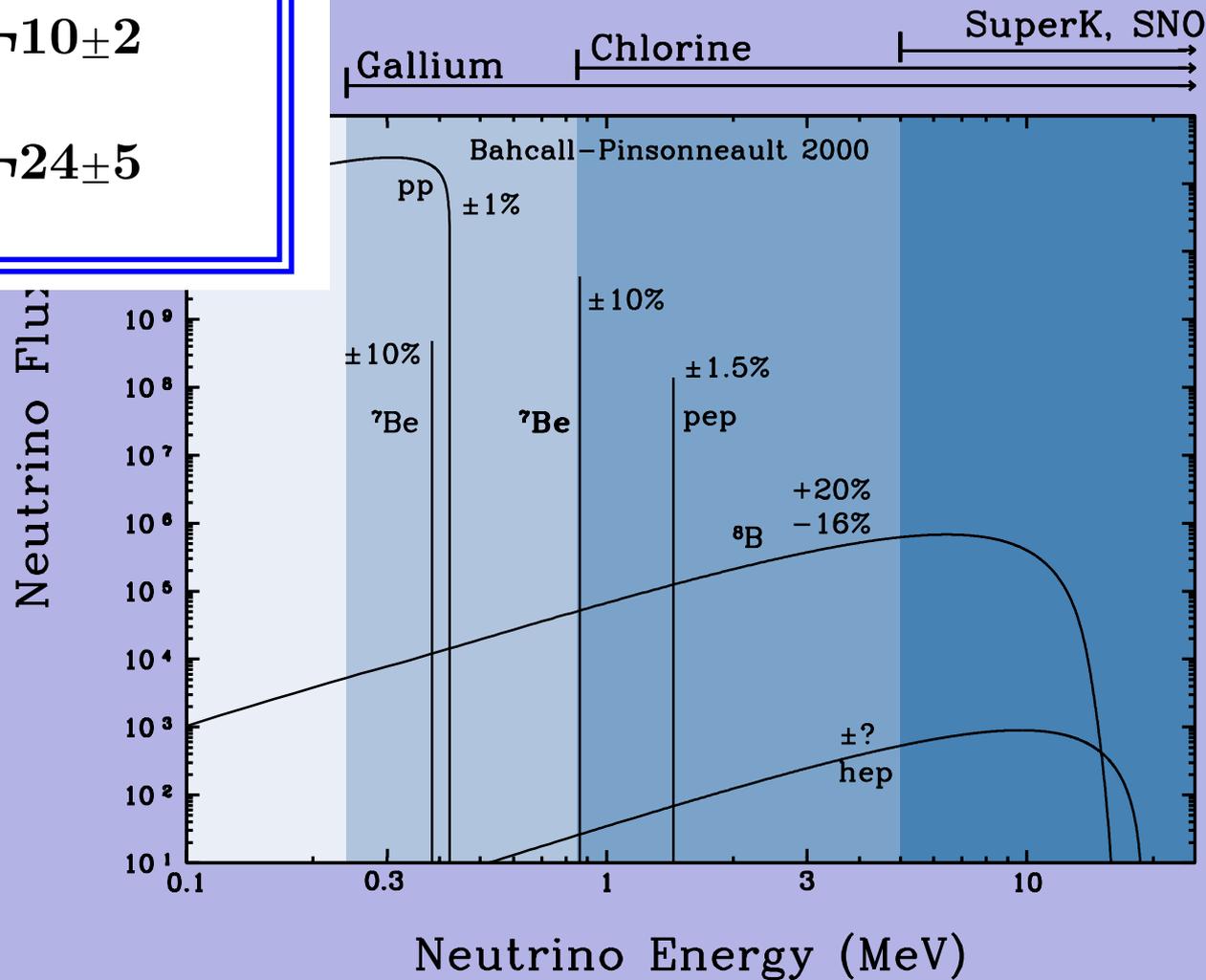


Spectre des neutrinos solaires

$$\Phi_{pp} \propto T^{-1,1 \pm 0,1}$$

$$\Phi_{\text{Be}} \propto T^{10 \pm 2}$$

$$\Phi_{\text{B}} \propto T^{24 \pm 5}$$



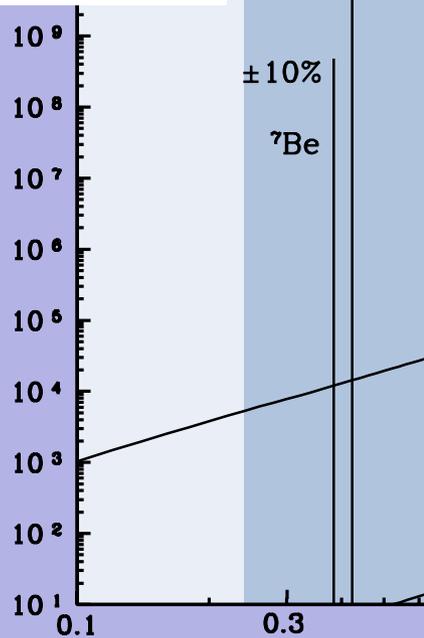
Spectre des neutrinos solaires

$$\Phi_{pp} \propto T^{-1,1 \pm 0,1}$$

$$\Phi_{Be} \propto T^{10 \pm 2}$$

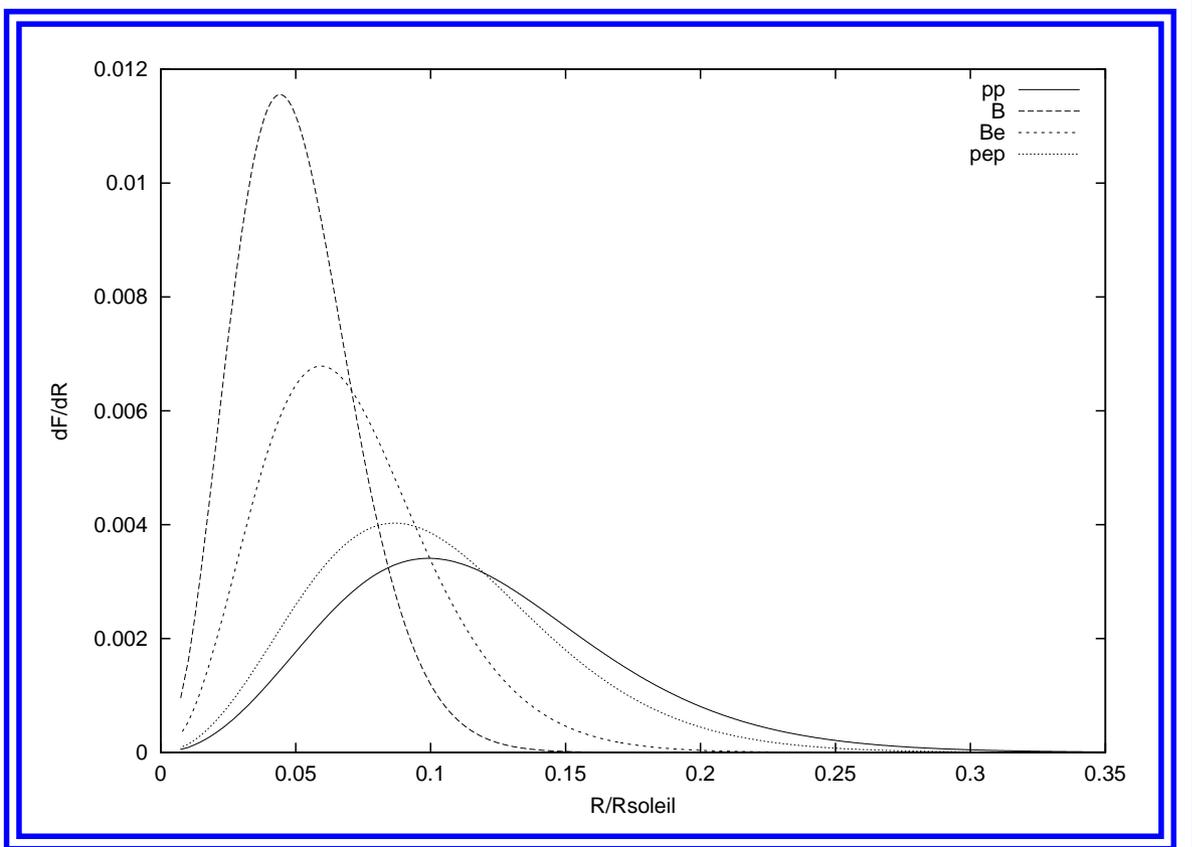
$$\Phi_B \propto T^{24 \pm 5}$$

Neutrino Flux

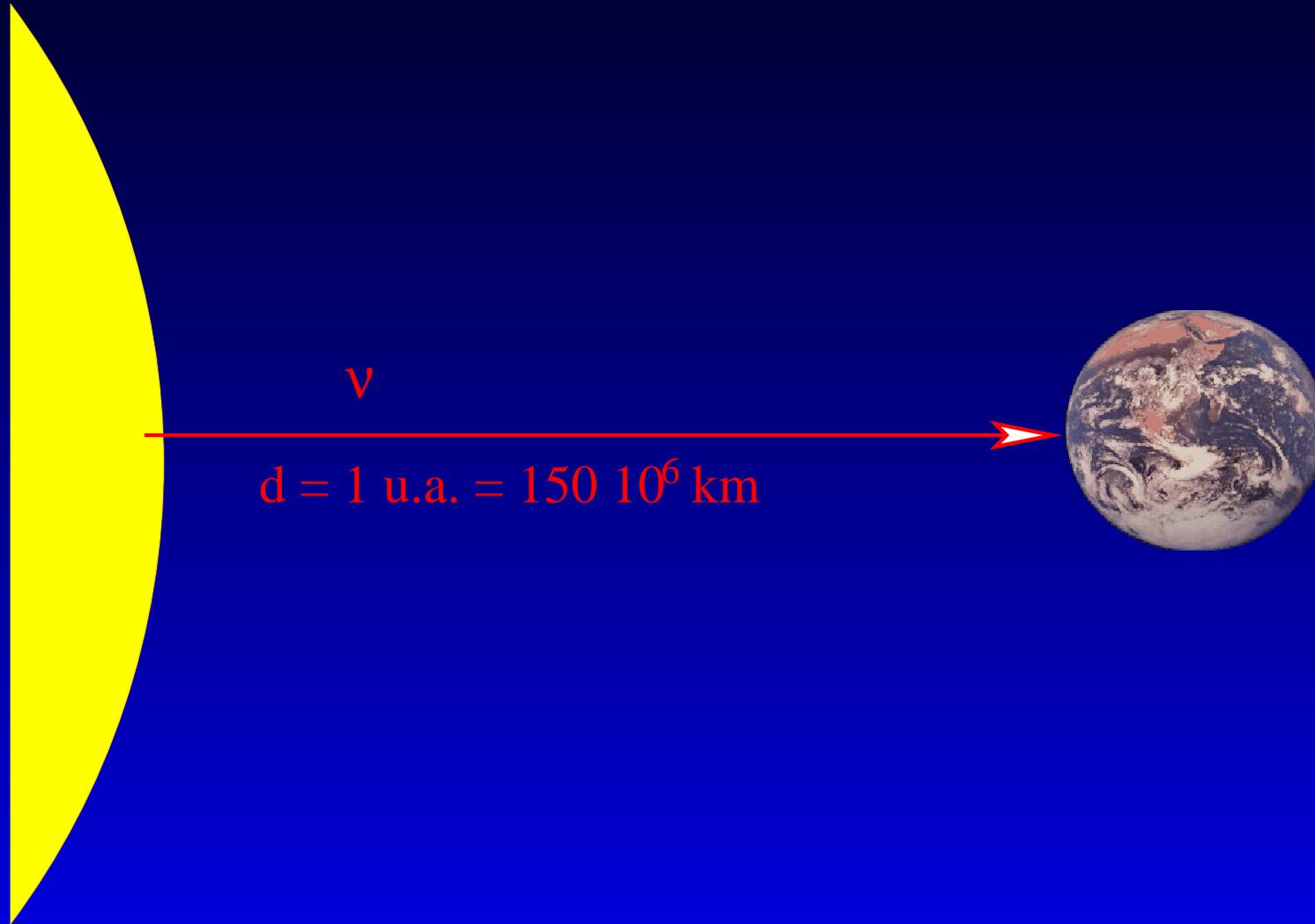


Neutrino Energy (MeV)

SuperK. SNO



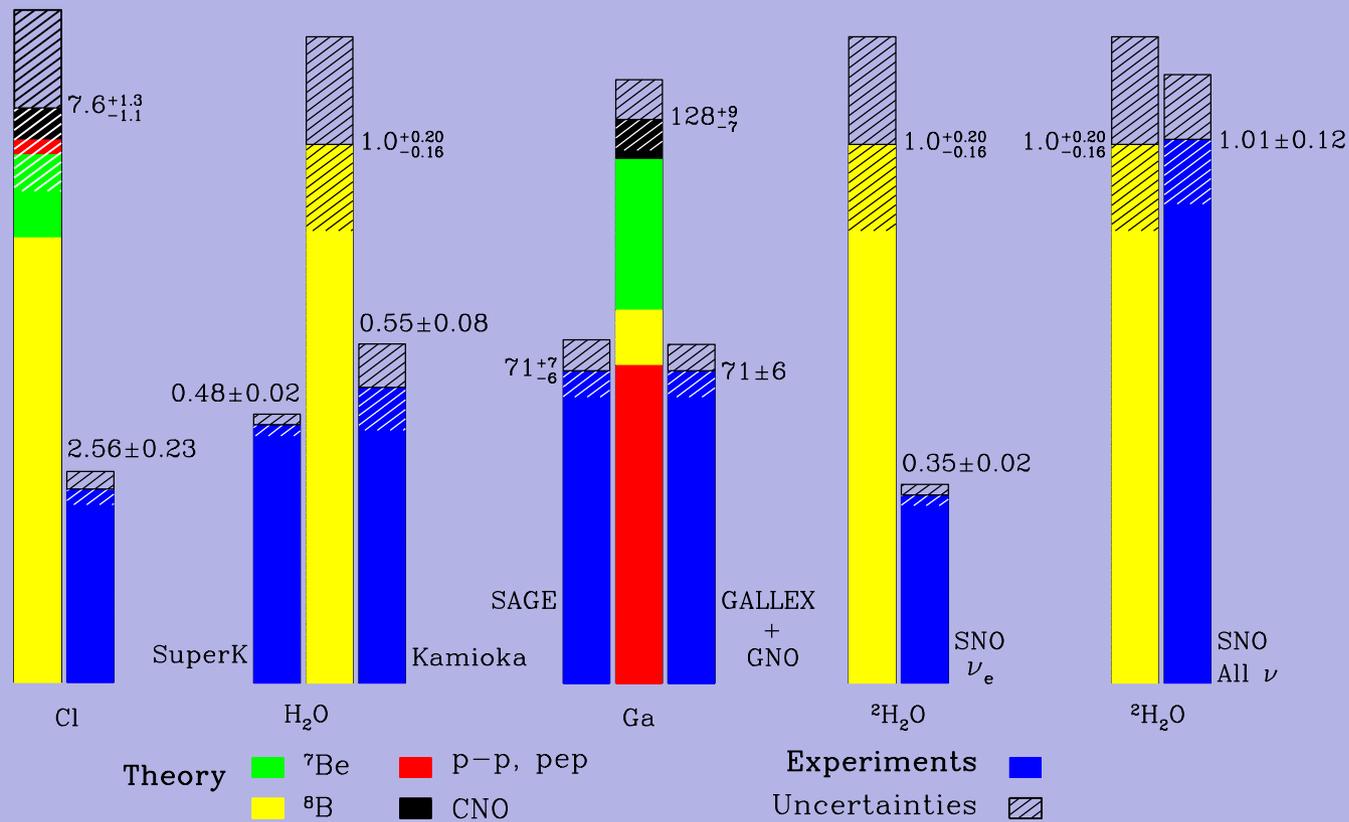
Du Soleil à la Terre



Le flux sur Terre est d'environ $65 \cdot 10^9 / \text{s} / \text{cm}^2$.

Expériences vs. Prédictions

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



Oscillations à deux familles dans le vide

Oscillations à deux familles dans le vide

- ν_e et ν_μ  états propres de saveur

Oscillations à deux familles dans le vide

- ν_e et ν_μ \Rightarrow états propres de saveur
- ν_1 et ν_2 \Rightarrow états propres de masse

Oscillations à deux familles dans le vide

- ν_e et ν_μ \Rightarrow états propres de saveur
- ν_1 et ν_2 \Rightarrow états propres de masse

$$|\nu_l\rangle = \sum_{i=1}^2 U_{li} |\nu_i\rangle$$

où $l = e, \mu, U_{e1} = U_{\mu 2} = \cos \theta, U_{e2} = -U_{\mu 1} = \sin \theta$.

Oscillations à deux familles dans le vide

- ν_e et ν_μ \Rightarrow états propres de saveur
- ν_1 et ν_2 \Rightarrow états propres de masse

$$|\nu_l\rangle = \sum_{i=1}^2 U_{li} |\nu_i\rangle$$

où $l = e, \mu$, $U_{e1} = U_{\mu 2} = \cos \theta$, $U_{e2} = -U_{\mu 1} = \sin \theta$. **Donc**

$$|\nu(x)\rangle = \sum_{i=1}^2 U_{ei} e^{-ip_i x} |\nu_i\rangle$$

Oscillations à deux familles dans le vide

- ν_e et ν_μ \Rightarrow états propres de saveur
- ν_1 et ν_2 \Rightarrow états propres de masse

$$|\nu_l\rangle = \sum_{i=1}^2 U_{li} |\nu_i\rangle$$

où $l = e, \mu$, $U_{e1} = U_{\mu 2} = \cos \theta$, $U_{e2} = -U_{\mu 1} = \sin \theta$. **Donc**

$$|\nu(x)\rangle = \sum_{i=1}^2 U_{ei} e^{-ip_i x} |\nu_i\rangle$$

Il vient

$$P(x, \nu_e \rightarrow \nu_l) = |\langle \nu_l | \nu(x) \rangle|^2 = \left| \sum_{i=1}^2 U_{il}^* U_{ei} e^{-ip_i x} \right|^2$$

Oscillations à deux familles dans le vide

- ν_e et ν_μ \Rightarrow états propres de saveur
- ν_1 et ν_2 \Rightarrow états propres de masse

Il vient

$$P(x, \nu_e \rightarrow \nu_l) = |\langle \nu_l | \nu(x) \rangle|^2 = \left| \sum_{i=1}^2 U_{il}^* U_{ei} e^{-ip_i x} \right|^2$$

En particulier

$$P(x, \nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 1,27 \frac{\Delta m^2}{E} x$$

où Δm^2 en eV^2 , E en GeV et x en km .

Oscillations à deux familles dans le vide

- ν_e et ν_μ
- ν_1 et ν_2

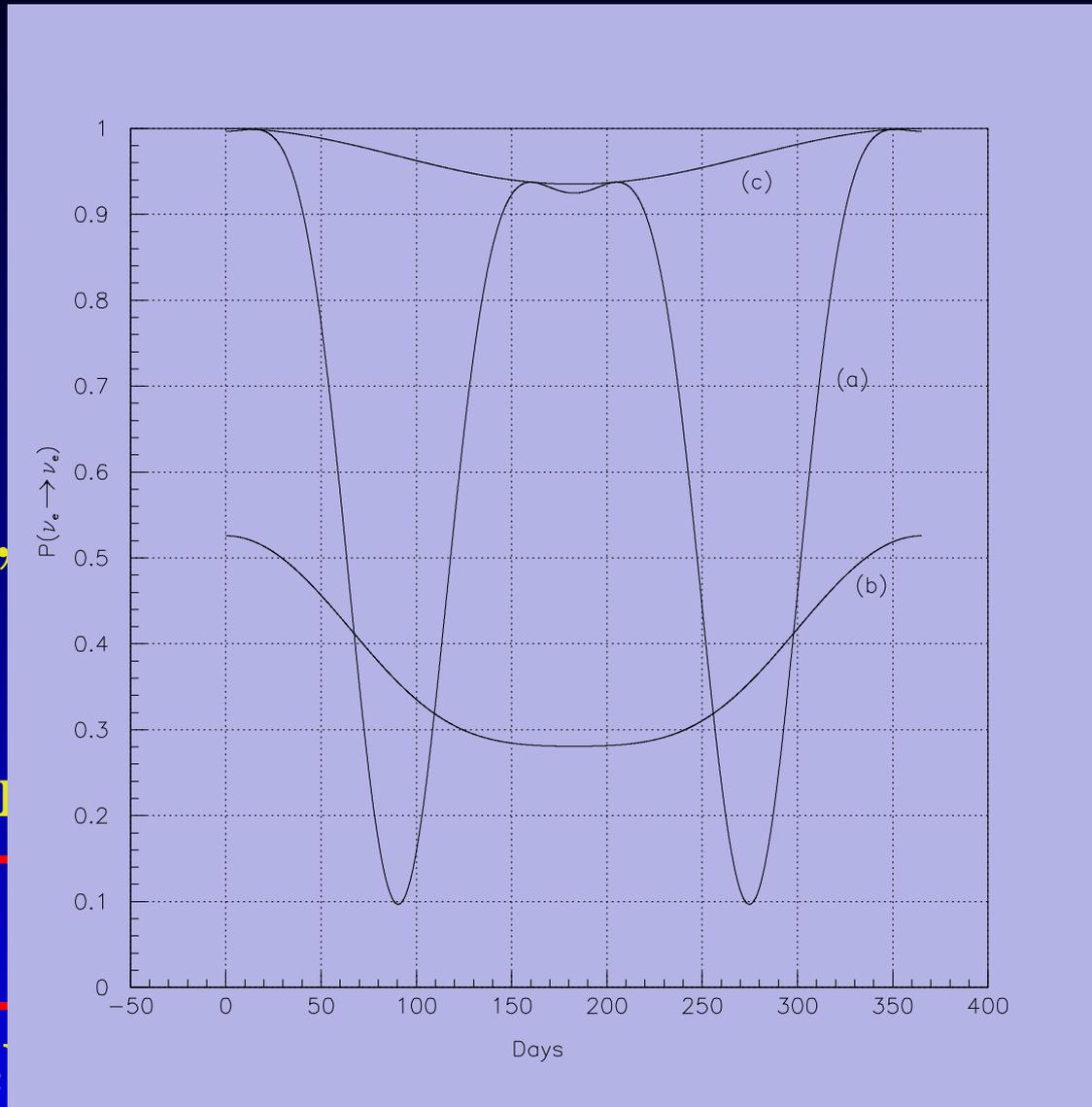
Il vient

$$P(x, \dots)$$

En particulier

$$P(x, \dots)$$

où Δm^2 en eV²



$$ip_i x$$

$$\frac{\Delta m^2}{E} x$$

Oscillations dans la matière

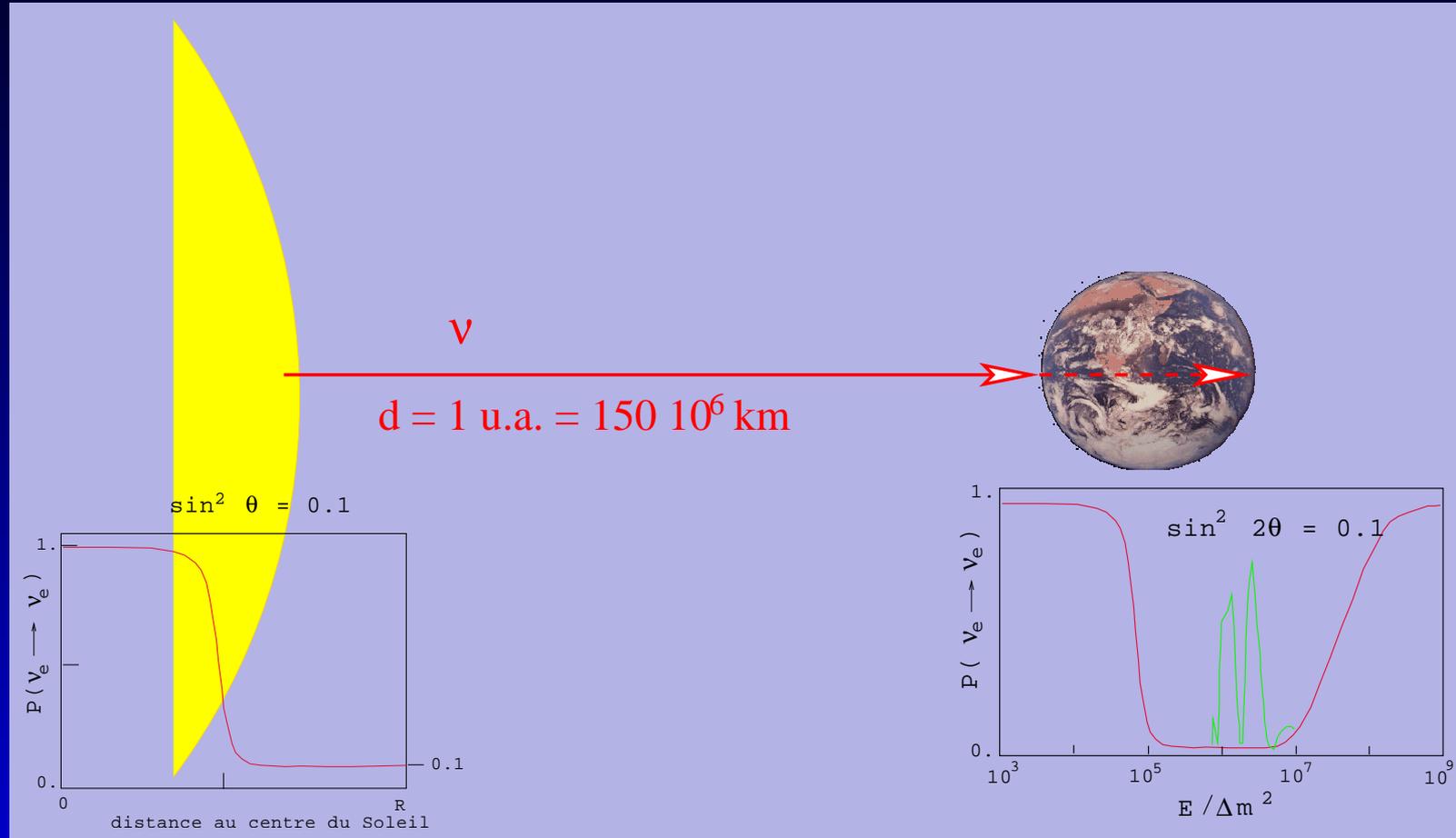
En présence de matière, la probabilité $\nu_e \rightarrow \nu_e$ change en

$$P(x, \nu_e \rightarrow \nu_e) = P_1 \cos^2 \theta + (1 - P_1) \sin^2 \theta + 2\sqrt{P_1(1 - P_1)} \sin \theta \cos \theta \cos \left(2,45 \frac{\Delta m^2}{E} x + \delta \right)$$

L'origine du changement de $P(x, \nu_e \rightarrow \nu_e)$ vient de la dissymétrie :

- Les ν_e interagissent par courants neutres (échange de Z^0) et courants chargés (échange de W^\pm)
- Les ν non électroniques (ν_μ, ν_τ) n'interagissent que par courants neutres

Régénération dans la Terre



Oscillations à trois familles de neutrinos

Le mélange des neutrinos s'explique par la matrice de mélange MNSP
(MAKI, NAKAGAWA, SAKATA, PONTECORVO) :

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

Oscillations à trois familles de neutrinos

La paramétrisation usuelle est :

$$U_{\text{MNSP}} = \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & U_{e3} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}U_{e3}^* & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}U_{e3}^* & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}U_{e3}^* & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}U_{e3}^* & c_{23}c_{13} \end{bmatrix}$$

où

- $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$
- $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$
- $U_{e3} = s_{13}e^{-i\delta}$
- δ est la phase de violation de CP de Dirac

Oscillations à trois familles de neutrinos

La paramétrisation usuelle est :

$$U_{\text{MNSP}} = \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & U_{e3} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}U_{e3}^* & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}U_{e3}^* & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}U_{e3}^* & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}U_{e3}^* & c_{23}c_{13} \end{bmatrix}$$

➡ **Contrainte de CHOOZ :**

$$\theta_{13} = \theta_{\text{CHOOZ}} \leq 10^\circ$$

Oscillations à trois familles de neutrinos

La paramétrisation usuelle est :

$$U_{\text{MNSP}} = \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & U_{e3} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}U_{e3}^* & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}U_{e3}^* & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}U_{e3}^* & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}U_{e3}^* & c_{23}c_{13} \end{bmatrix}$$

→ **Contrainte de CHOOZ :**

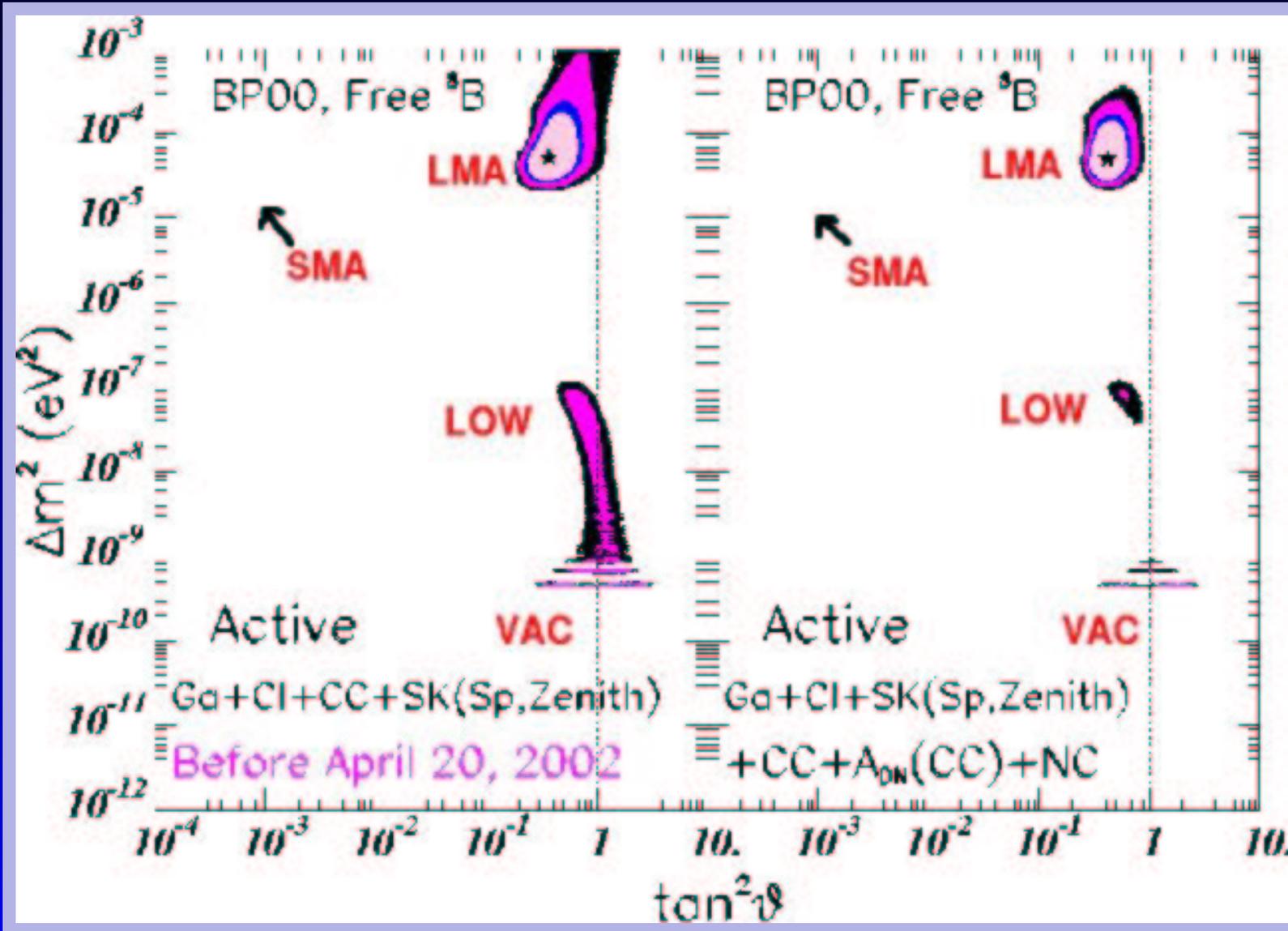
$$\theta_{13} = \theta_{\text{CHOOZ}} \leq 10^\circ$$

→ **Contraint par ν_{ATM} (SK),**

$$\theta_{23} = \theta_{\text{ATM}} \approx \frac{\pi}{4},$$

le mélange est maximal

Zone Δm^2 vs $\tan^2 \theta$



Neutrinos solaires, où en est-on ?

- **Changement de saveur prouvé par SNO**

Neutrinos solaires, où en est-on ?

- **Changement de saveur prouvé par SNO**
- **Solution LMA dans $(\Delta m^2, \tan^2 \theta)$ préférée mais pas encore confirmée (cf KAMLAND sous peu)**

Neutrinos solaires, où en est-on ?

- **Changement de saveur prouvé par SNO**
- **Solution LMA dans $(\Delta m^2, \tan^2 \theta)$ préférée mais pas encore confirmée (cf KAMLAND sous peu)**
- **Faible influence spectrale montrée par SuperKamiokande**

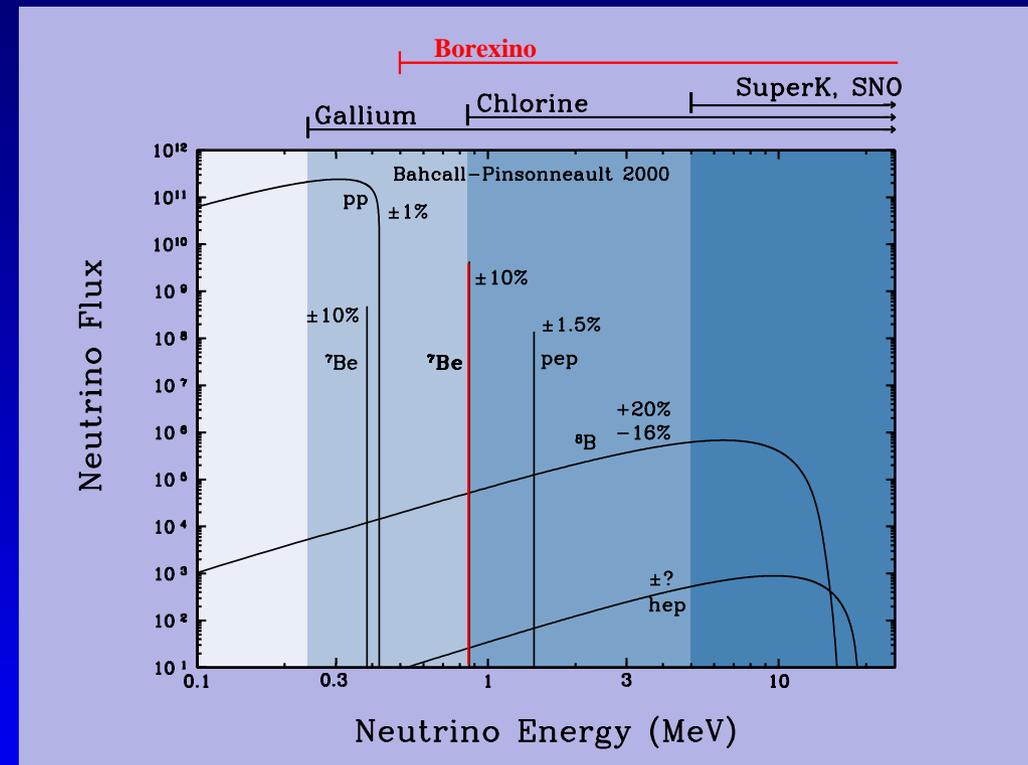
Neutrinos solaires, où en est-on ?

- Changement de saveur prouvé par SNO
- Solution LMA dans $(\Delta m^2, \tan^2 \theta)$ préférée mais pas encore confirmée (cf KAMLAND sous peu)
- Faible influence spectrale montrée par SuperKamiokande

⇒ Pas de mesure temps réel pour les neutrinos solaires < 5 MeV

⇒ Faible statistique

⇒ Aucune mesure la seule composante ${}^7_4\text{Be}$ séparée



2 Borexino et le prototype CTF

Les laboratoires du Gran Sasso

Les Laboratori Nazionali del Gran Sasso se situent dans les Abruzzes, Italie.



Les laboratoires du Gran Sasso

Les *Laboratori Nazionali del Gran Sasso* se situent dans les Abruzzes, Italie.



Les laboratoires du Gran Sasso

Les *Laboratori Nazionali del Gran Sasso* se situent dans les Abruzzes, Italie.

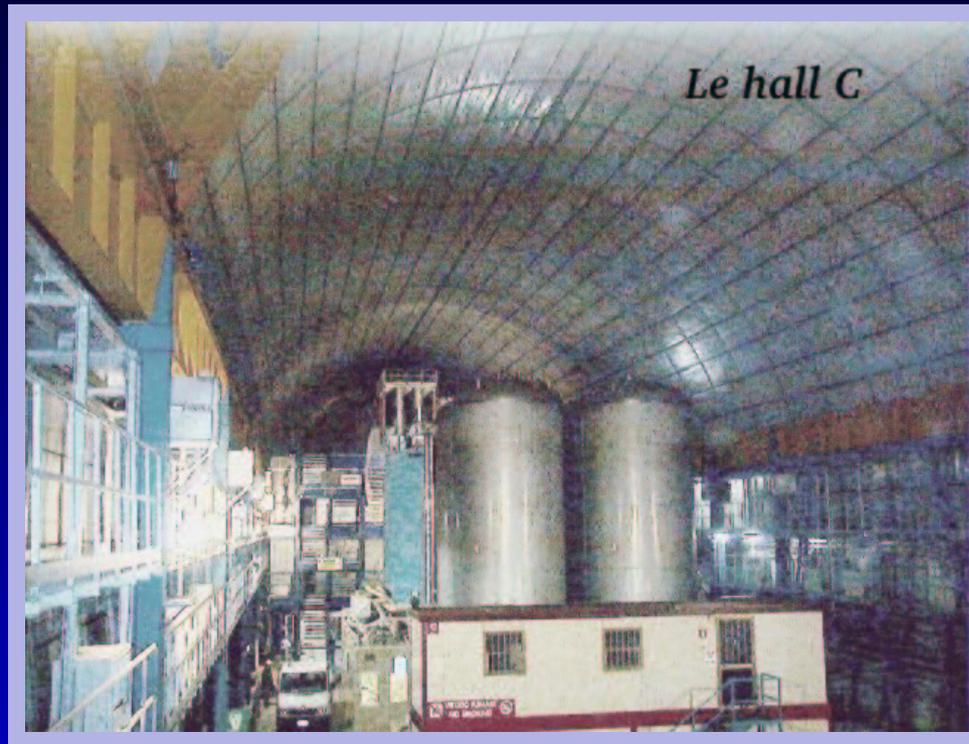


Il y a 3 halls souterrains, situés sous la chaîne de montagne du Gran Sasso.



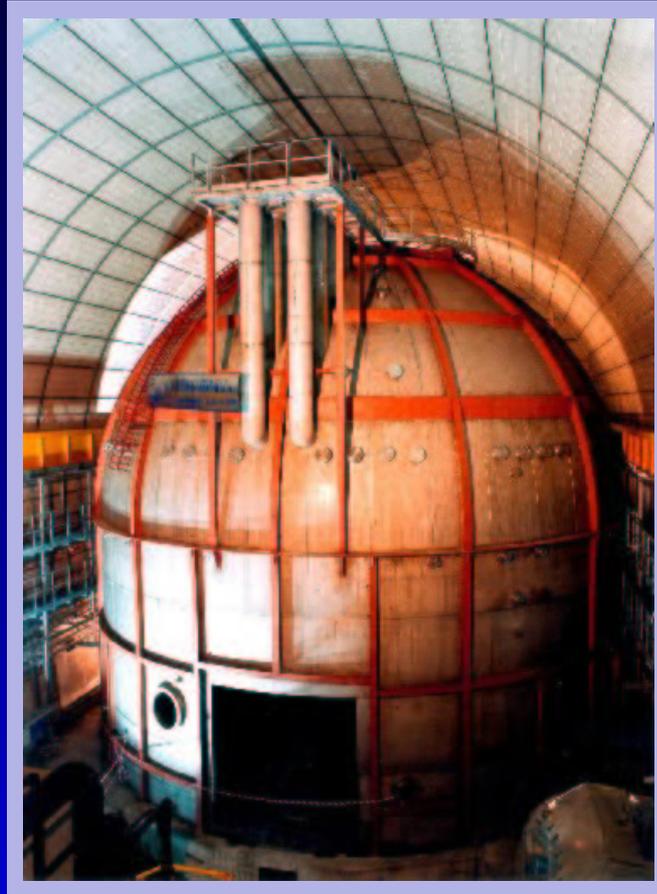
Introduction à Borexino

Borexino est situé dans le Hall C du LGNS.

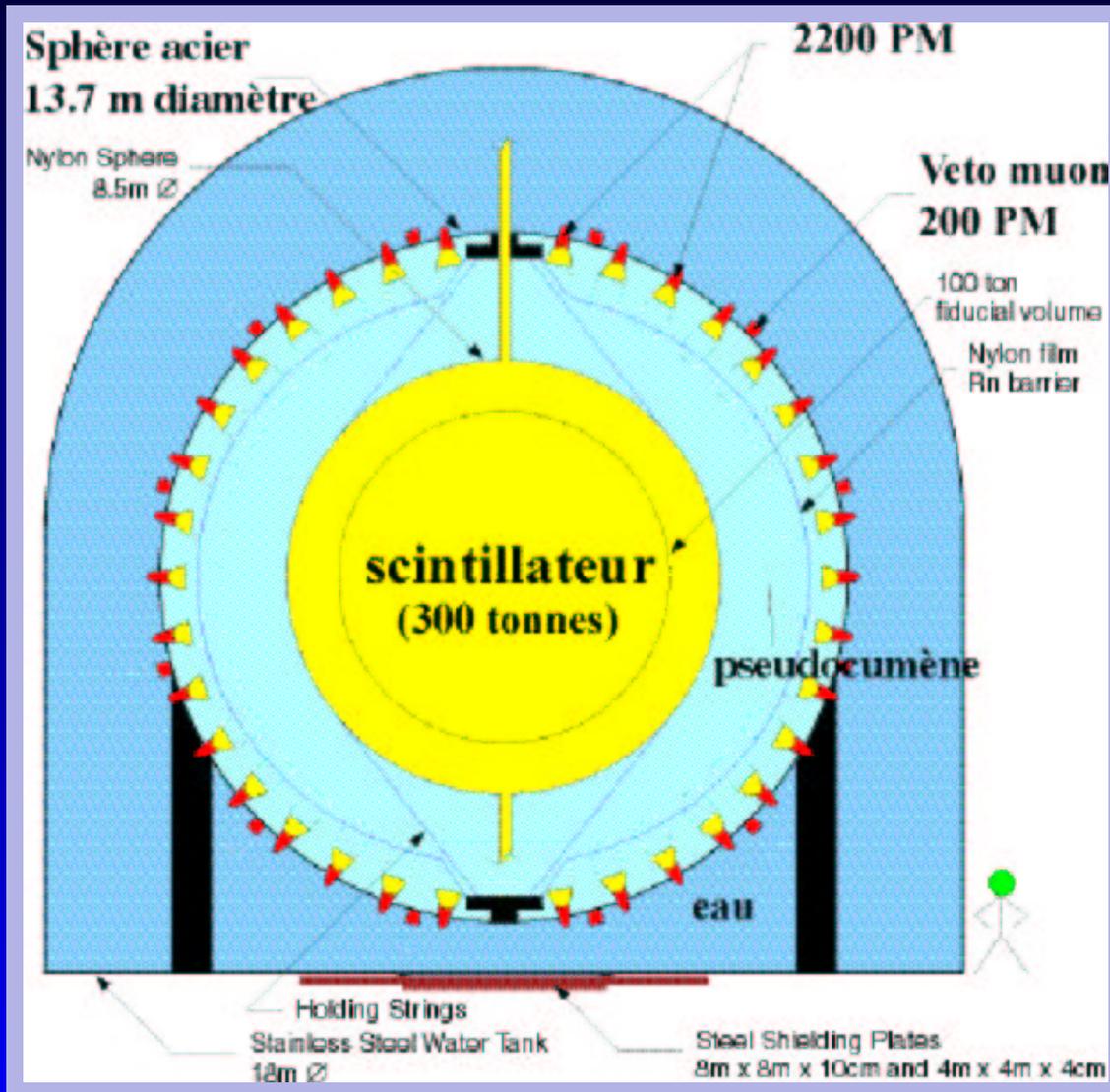


Introduction à Borexino

Borexino est situé dans le Hall C du LGNS.

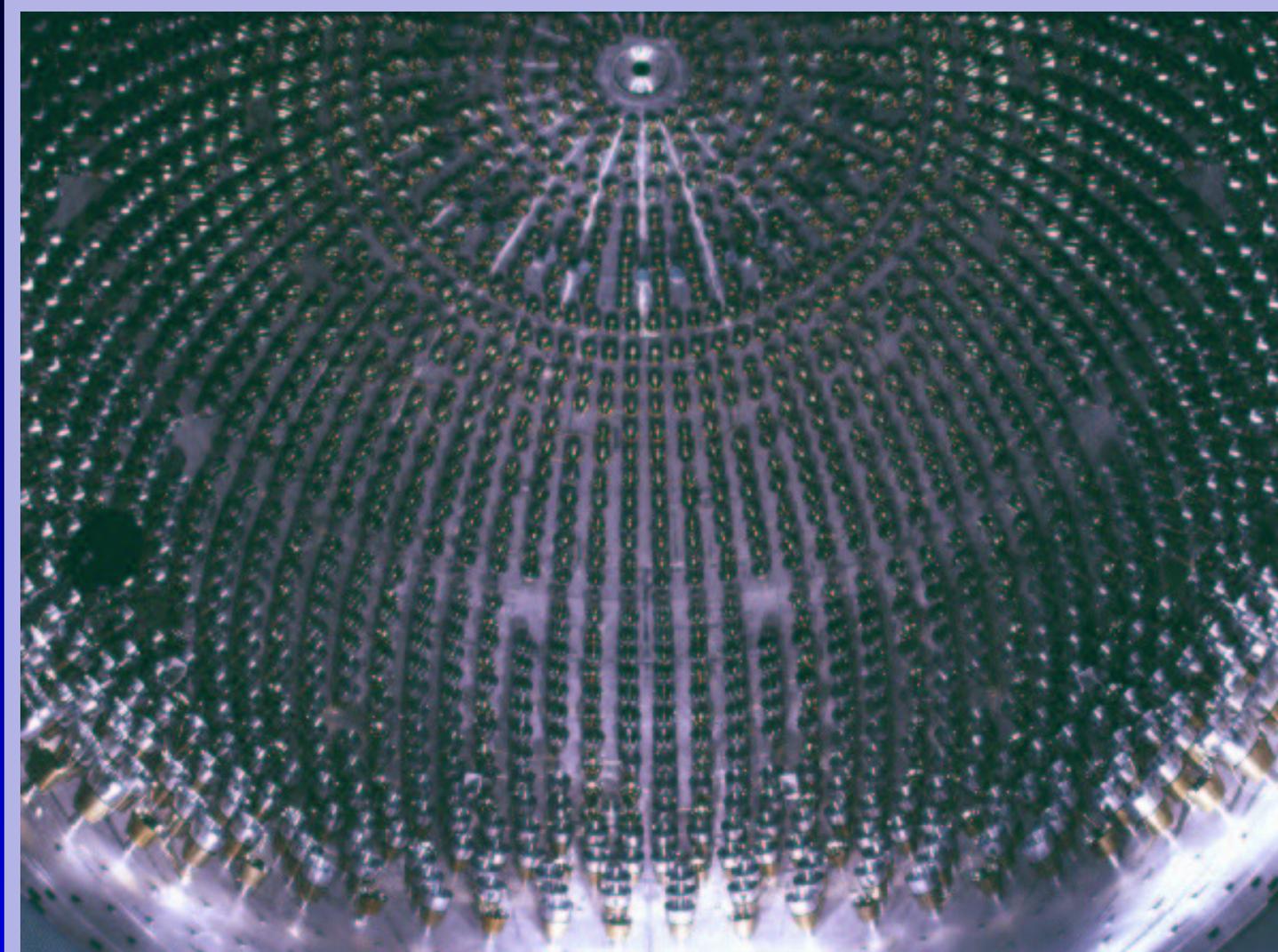


Introduction à Borexino

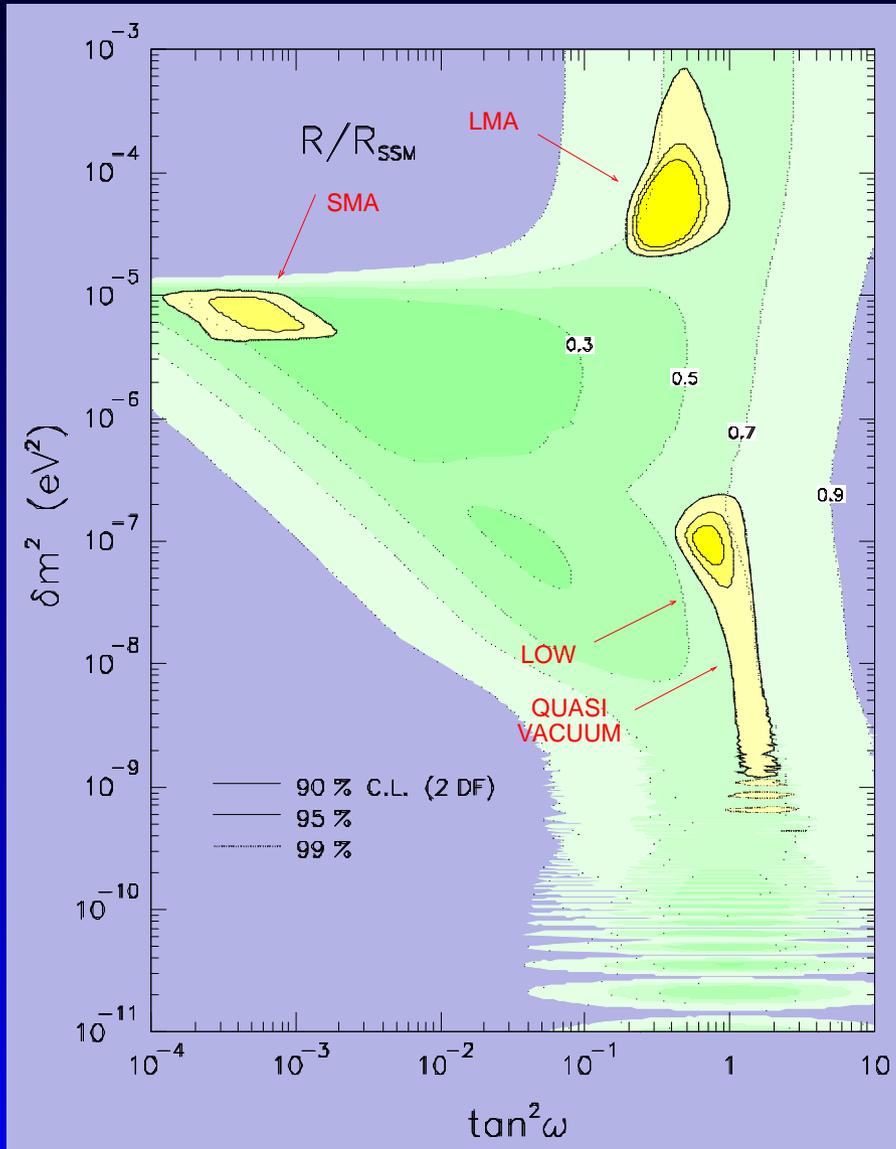


- réaction $\nu e \rightarrow \nu e$ dans scintillateur liquide
- 100 t de volume fiduciel
- 40 ν par jour
- Protection bruit de fond interne (radiopureté) et externe (cosmiques)
- 300 photo-électrons par MeV

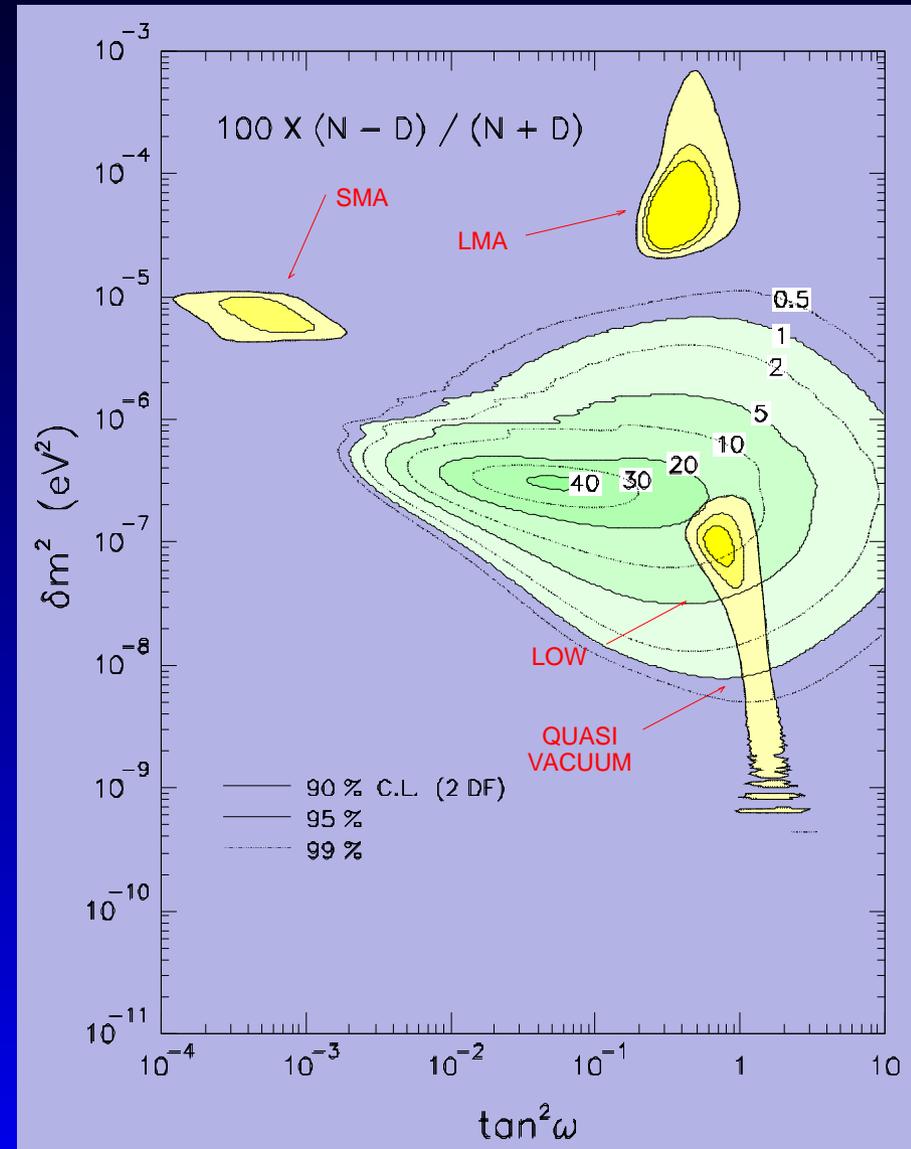
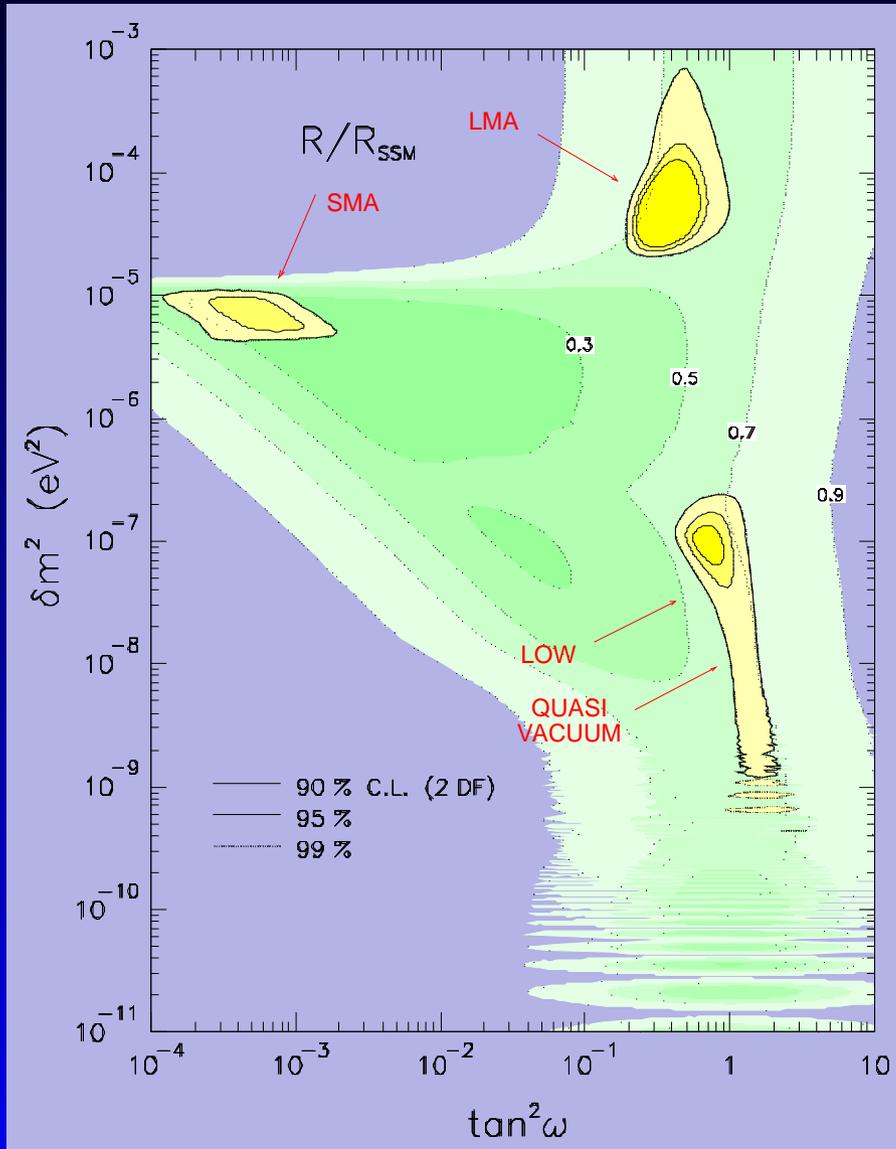
Introduction à Borexino



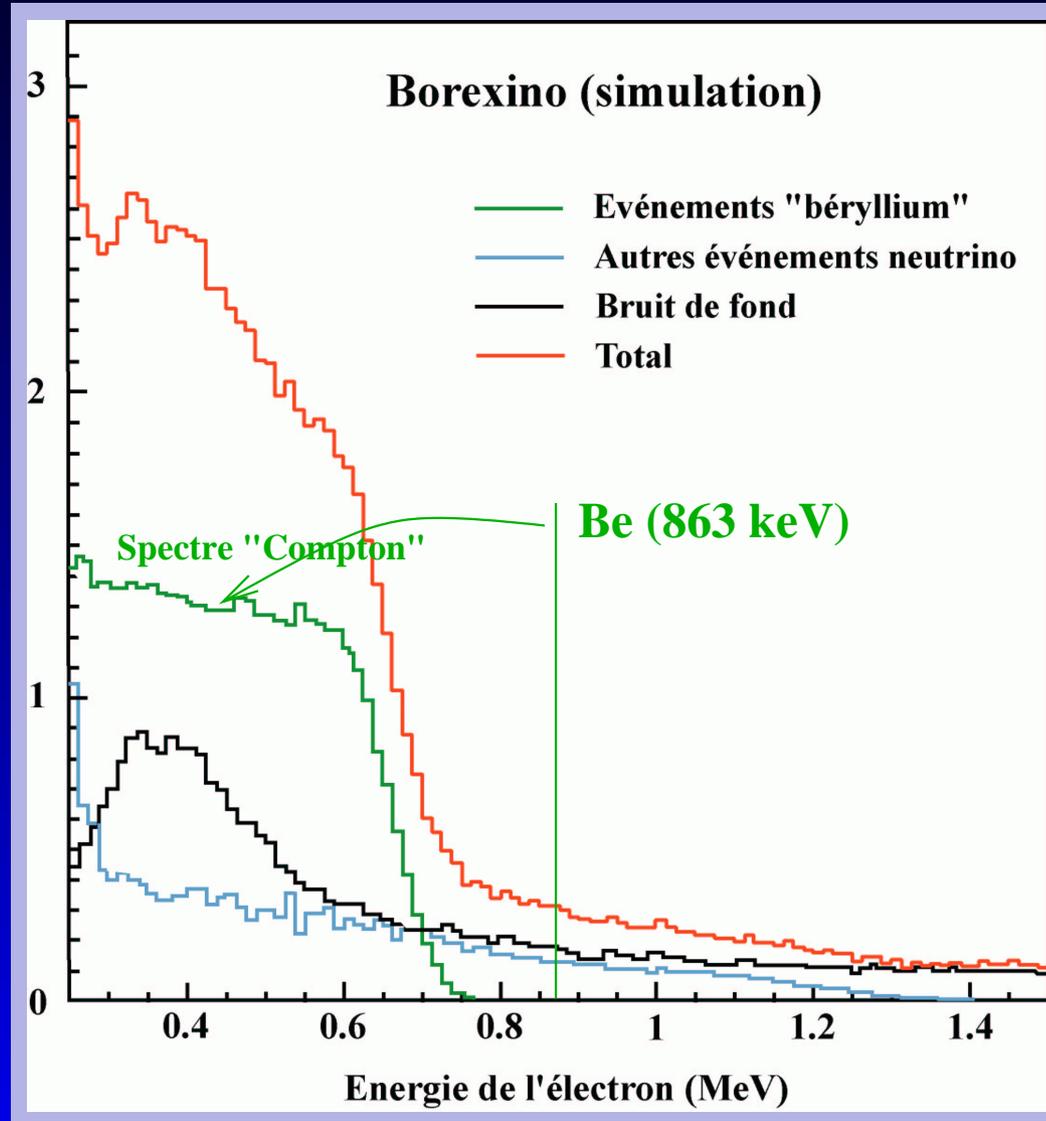
Borexino en 3 ans



Borexino en 3 ans



Spectre ν_{Be} vu par Borexino



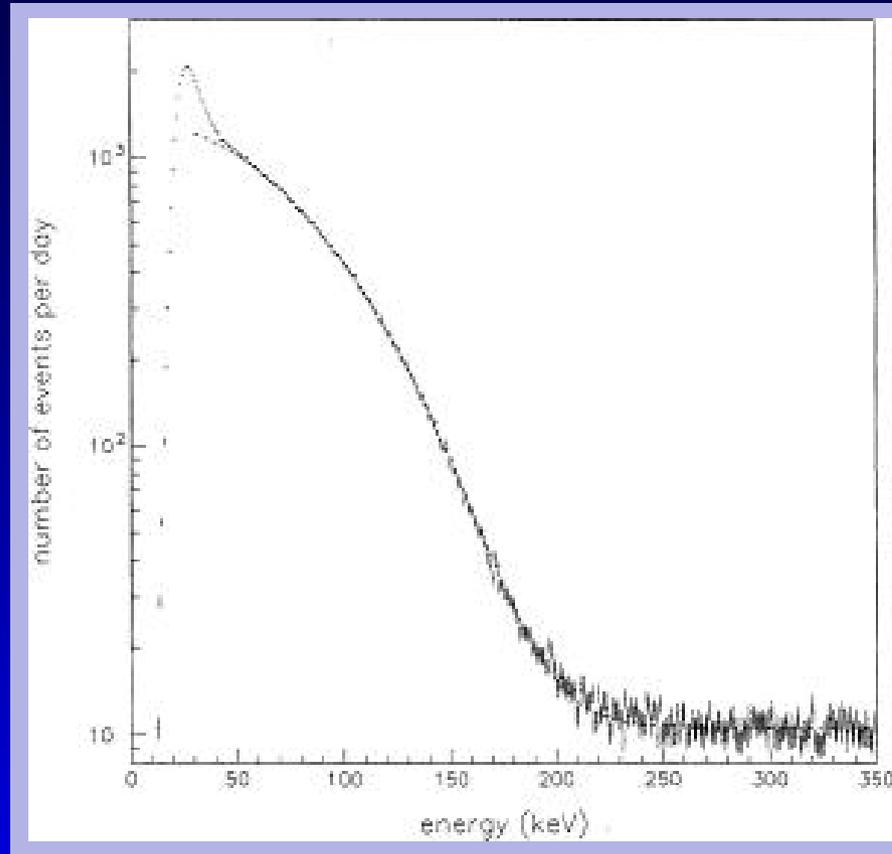
Bruit de fond dans Borexino

Coupure basse énergie (250 keV) imposée par la présence de $^{14}_6\text{C}$.

Bruit de fond dans Borexino

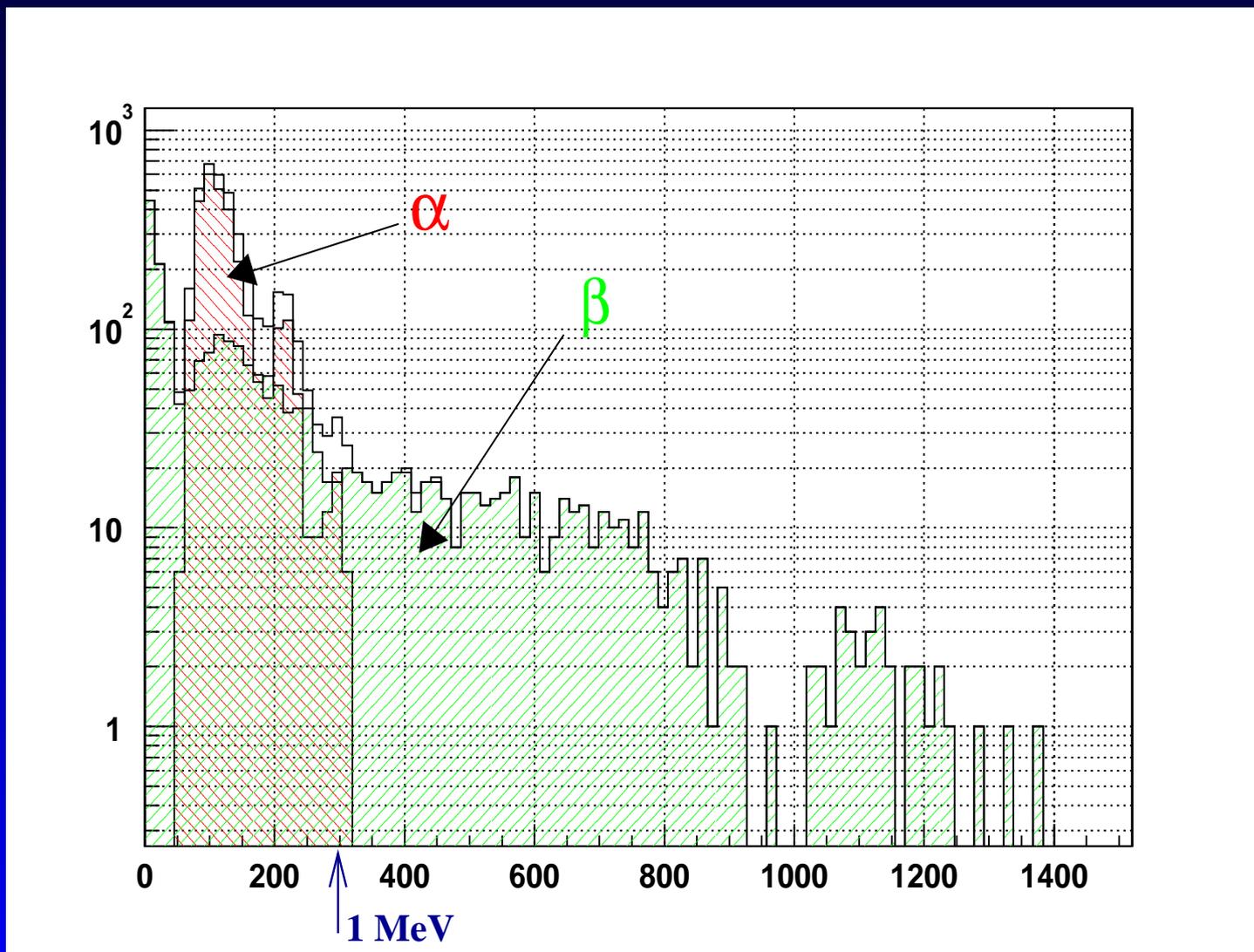
Coupure basse énergie (250 keV) imposée par la présence de $^{14}_6\text{C}$.

Spectre vu par CTF I : le $^{14}_6\text{C}$ domine largement



Bruit de fond dans Borexino

Influence de la contamination $^{238}_{92}\text{U}$, $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{40}_{19}\text{K}$ (pas de $^{14}_6\text{C}$)

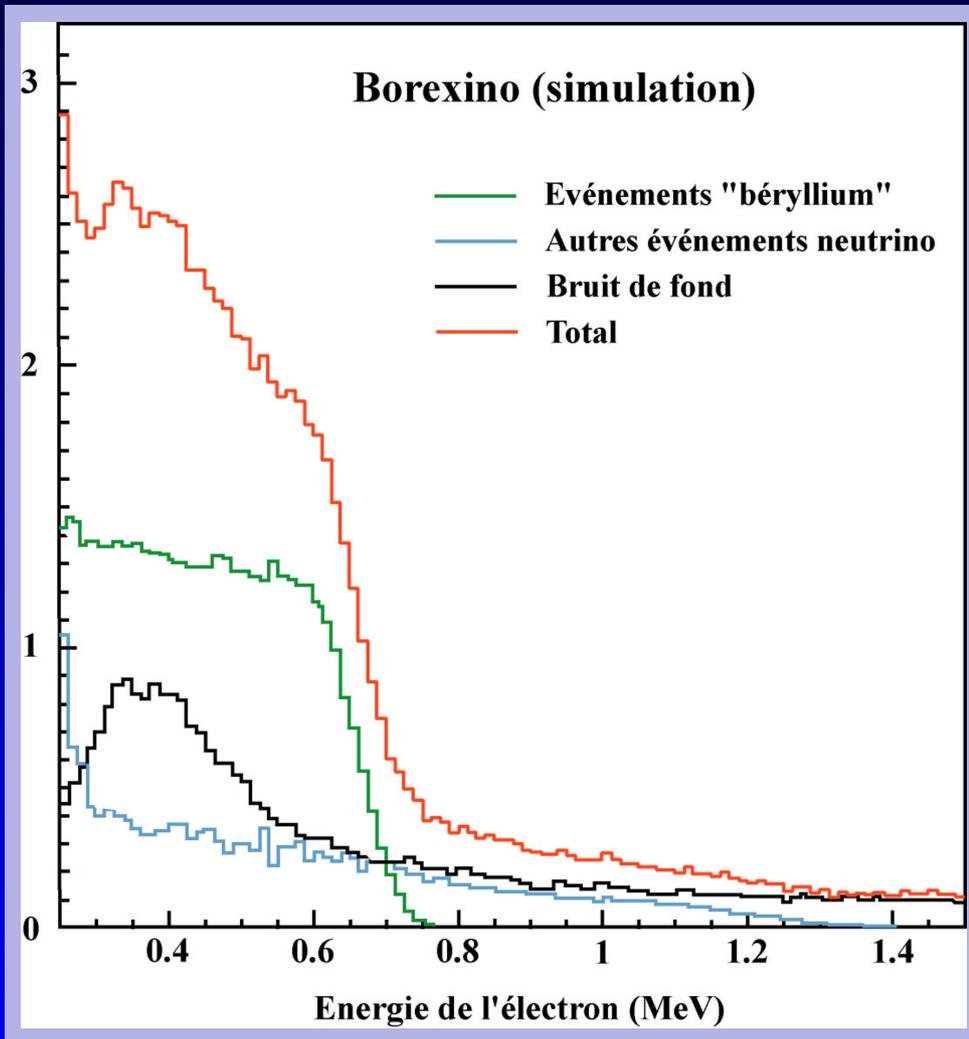


Bruit de fond dans Borexino

Spectre de Borexino :

Contraintes nominales :

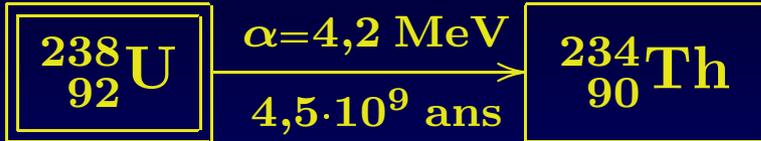
- ${}^{14}_6\text{C} : 10^{-18} \text{ g/g}$
- ${}^{238}_{92}\text{U}, {}^{232}_{90}\text{Th} : 10^{-16} \text{ g/g}$
- **Discrimination**
 $\alpha/\beta \geq 90\%$
- **Autres contaminants :**
 ${}^{40}_{19}\text{K}, {}^7_4\text{Be}, {}^{85}_{36}\text{Kr}$



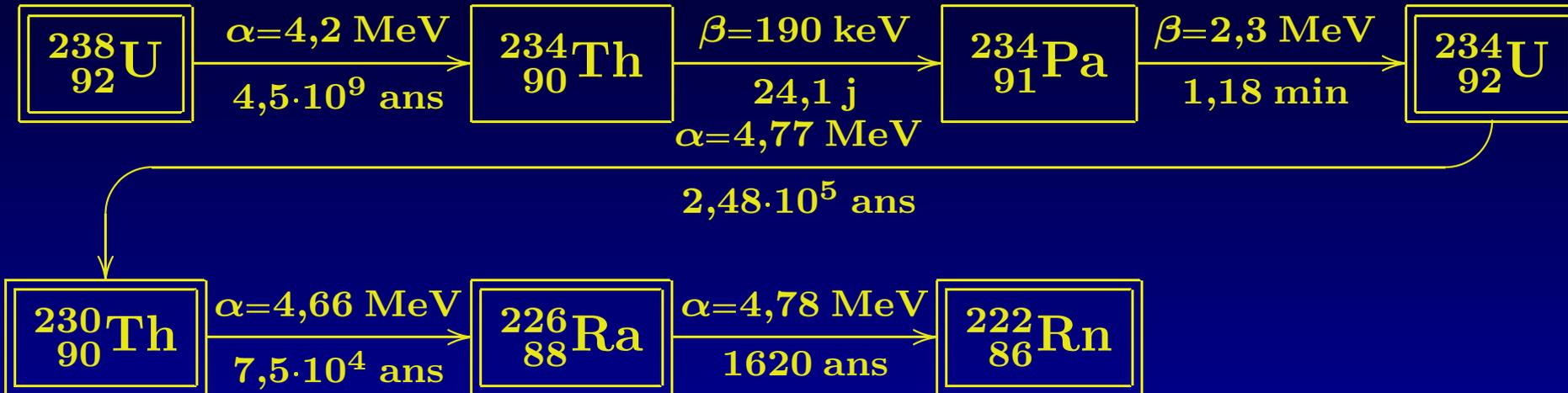
Chaîne de l'Uranium 238



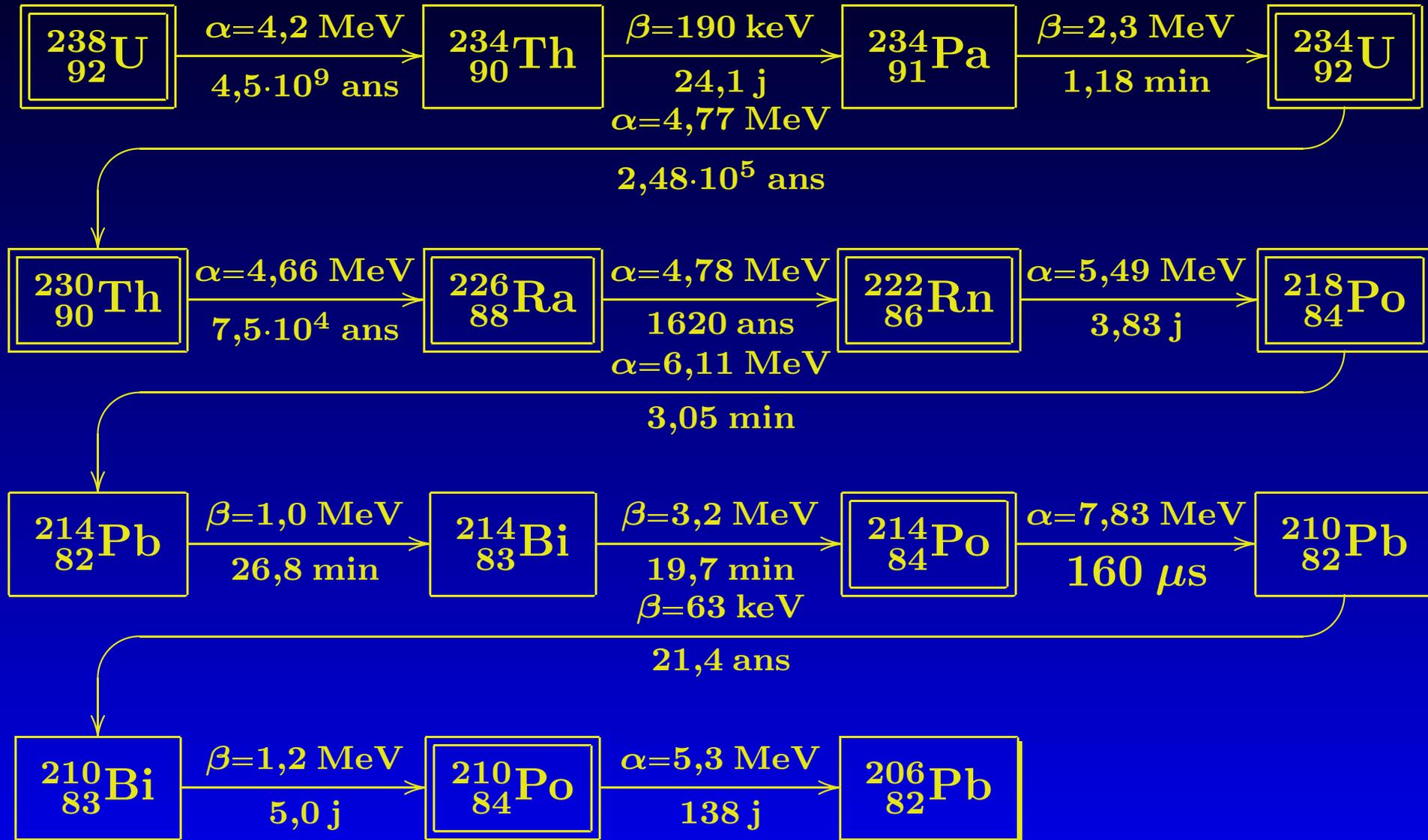
Chaîne de l'Uranium 238



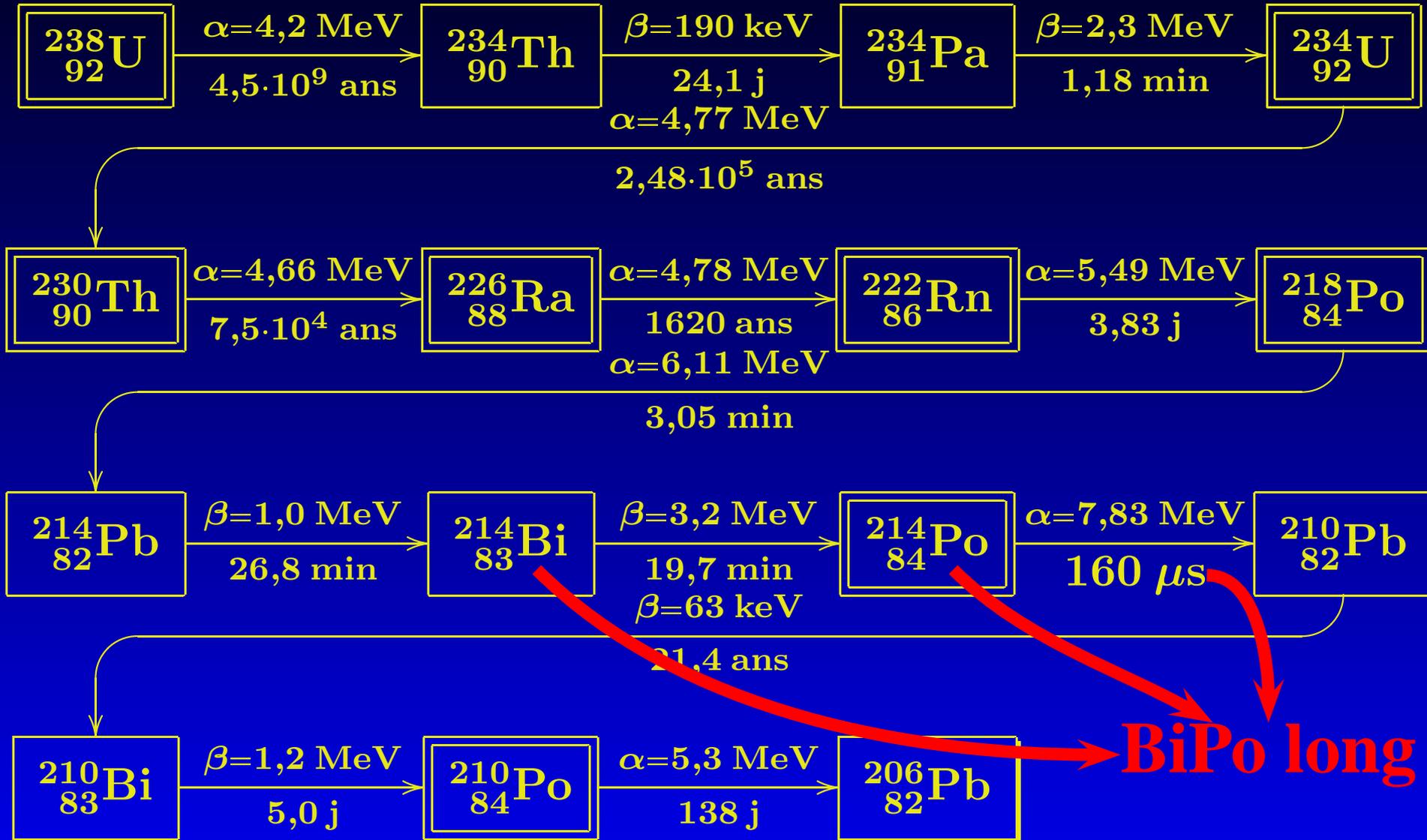
Chaîne de l'Uranium 238



Chaîne de l'Uranium 238



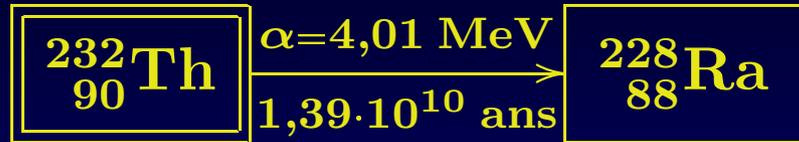
Chaîne de l'Uranium 238



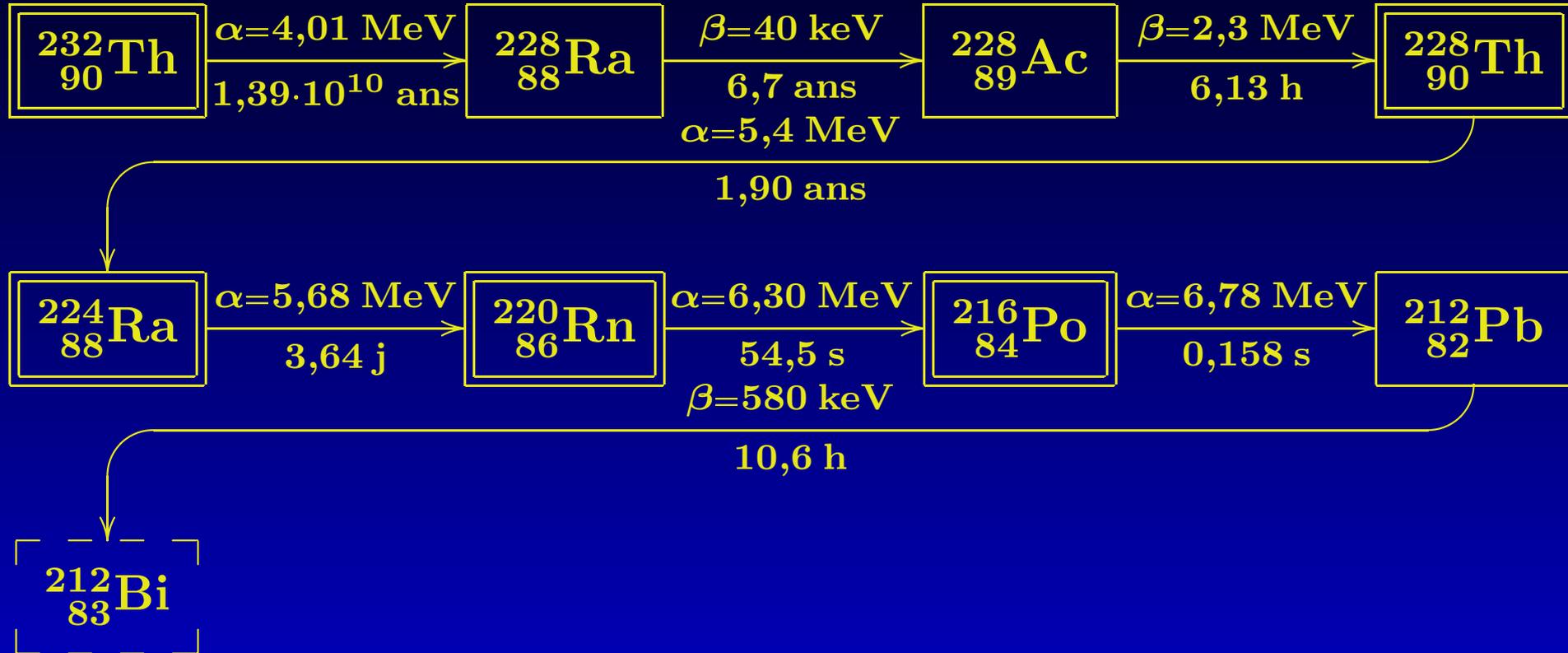
Chaîne du Thorium 232



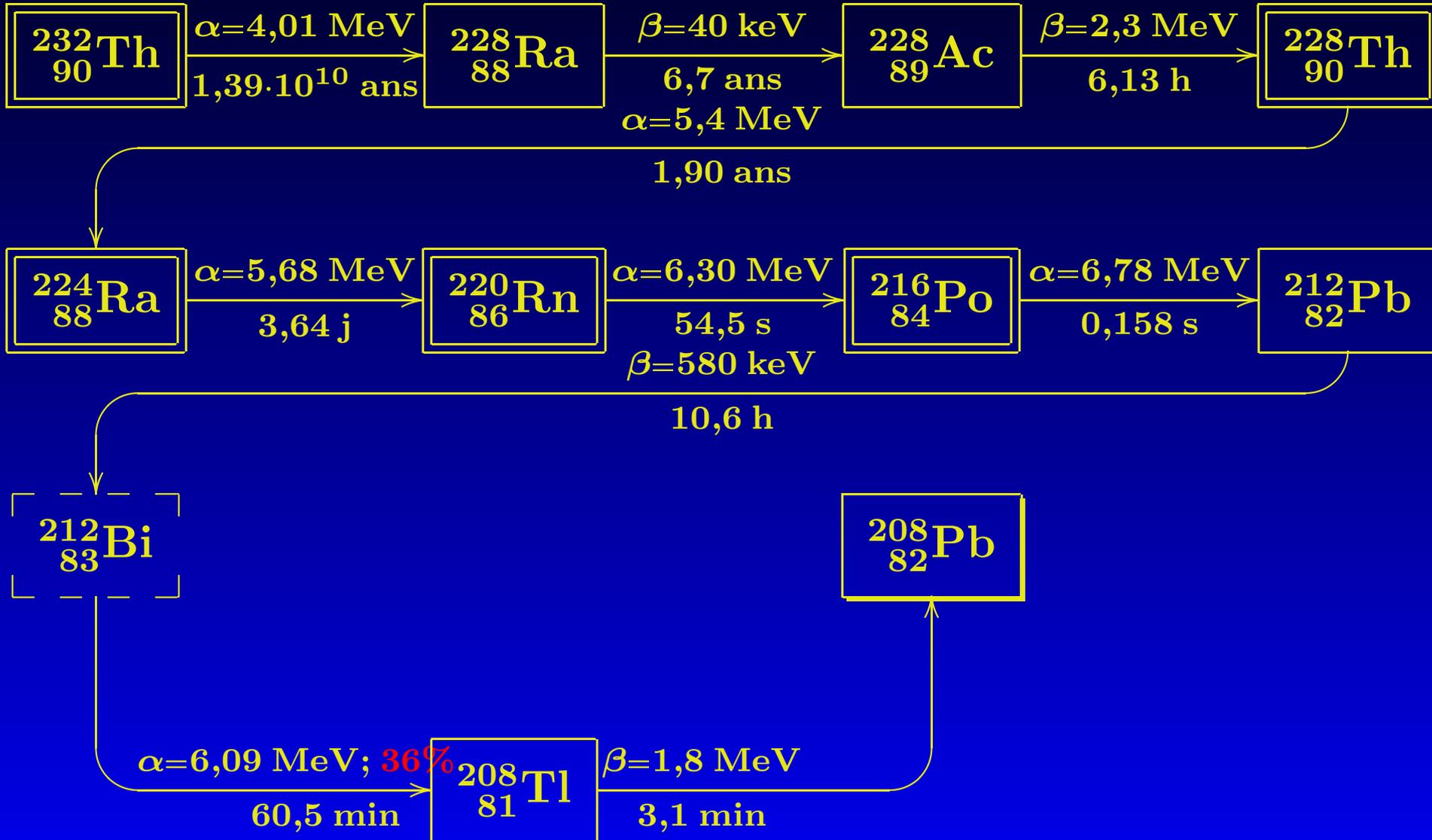
Chaîne du Thorium 232



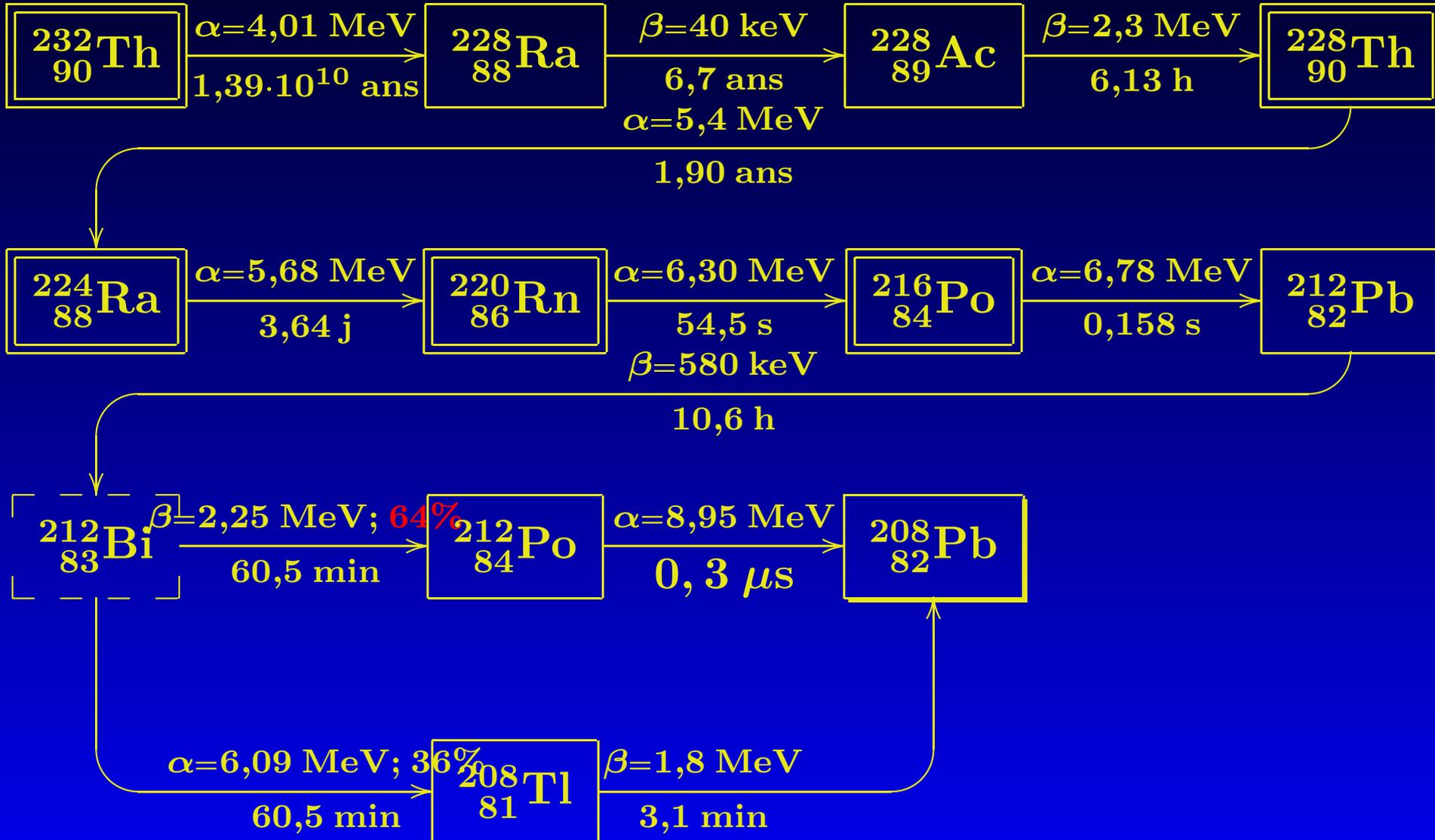
Chaîne du Thorium 232



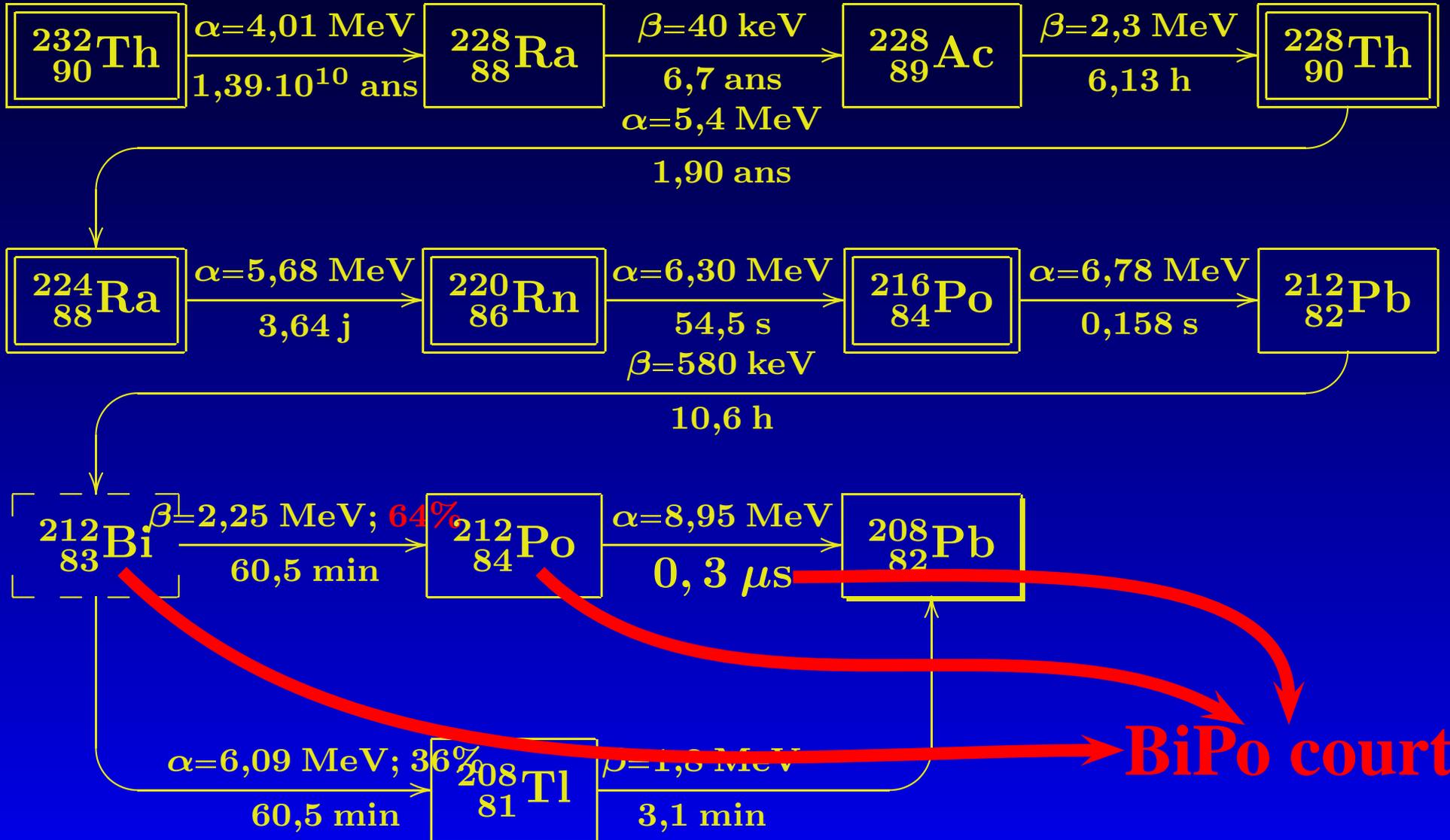
Chaîne du Thorium 232



Chaîne du Thorium 232



Chaîne du Thorium 232



Activité d'une chaîne

$$R_0 \xrightarrow{\tau_0} R_1 \xrightarrow{\tau_1} \dots \xrightarrow{\tau_{N-2}} R_{N-1}$$

Activité d'une chaîne



Avec le seul apport initial $[R_0] = [R_0]^0$, on a

$$\frac{d[R_0]}{dt} = -\frac{1}{\tau_0} [R_0]$$

$$\frac{d[R_i]}{dt} = -\frac{1}{\tau_i} [R_i] + \frac{1}{\tau_{i-1}} [R_{i-1}], \quad i \in \llbracket 1, N-2 \rrbracket$$

$$\frac{d[R_{N-1}]}{dt} = +\frac{1}{\tau_{N-2}} [R_{N-2}]$$

qui se résout en

$$[R_i] = \sum_{j=0}^i K_{ij} e^{-t/\tau_j}, \quad \text{avec } K_{ij} = \frac{K_{(i-1)j}}{\tau_{i-1}} \frac{\tau_i \tau_j}{\tau_j - \tau_i} \quad \text{et } K_{ii} = -\sum_{j<i} K_{ji}, \quad K_{00} = [R_0]^0$$

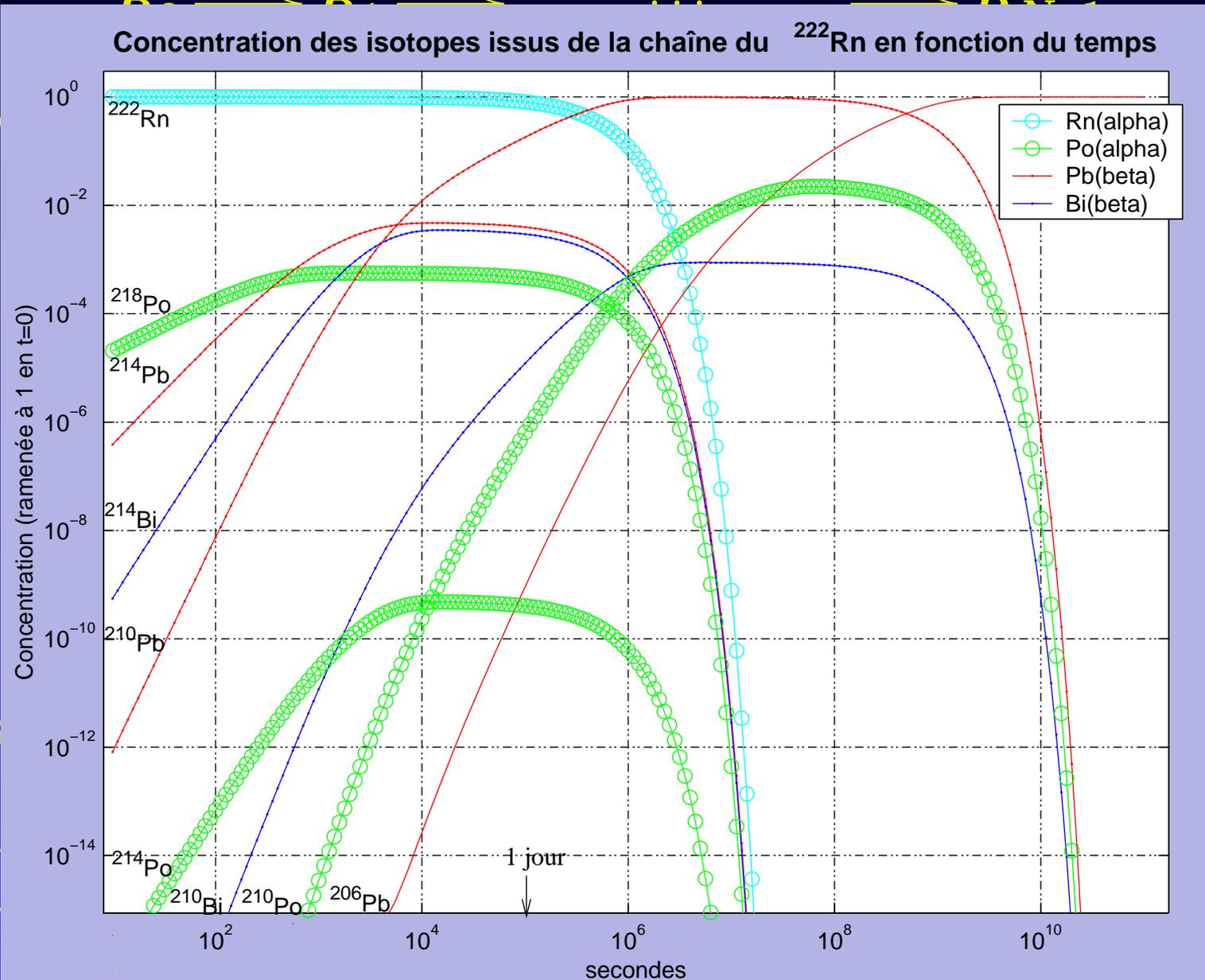
Activité d'une chaîne

$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow \dots \rightarrow R_n$

Avec le s

qui se rés

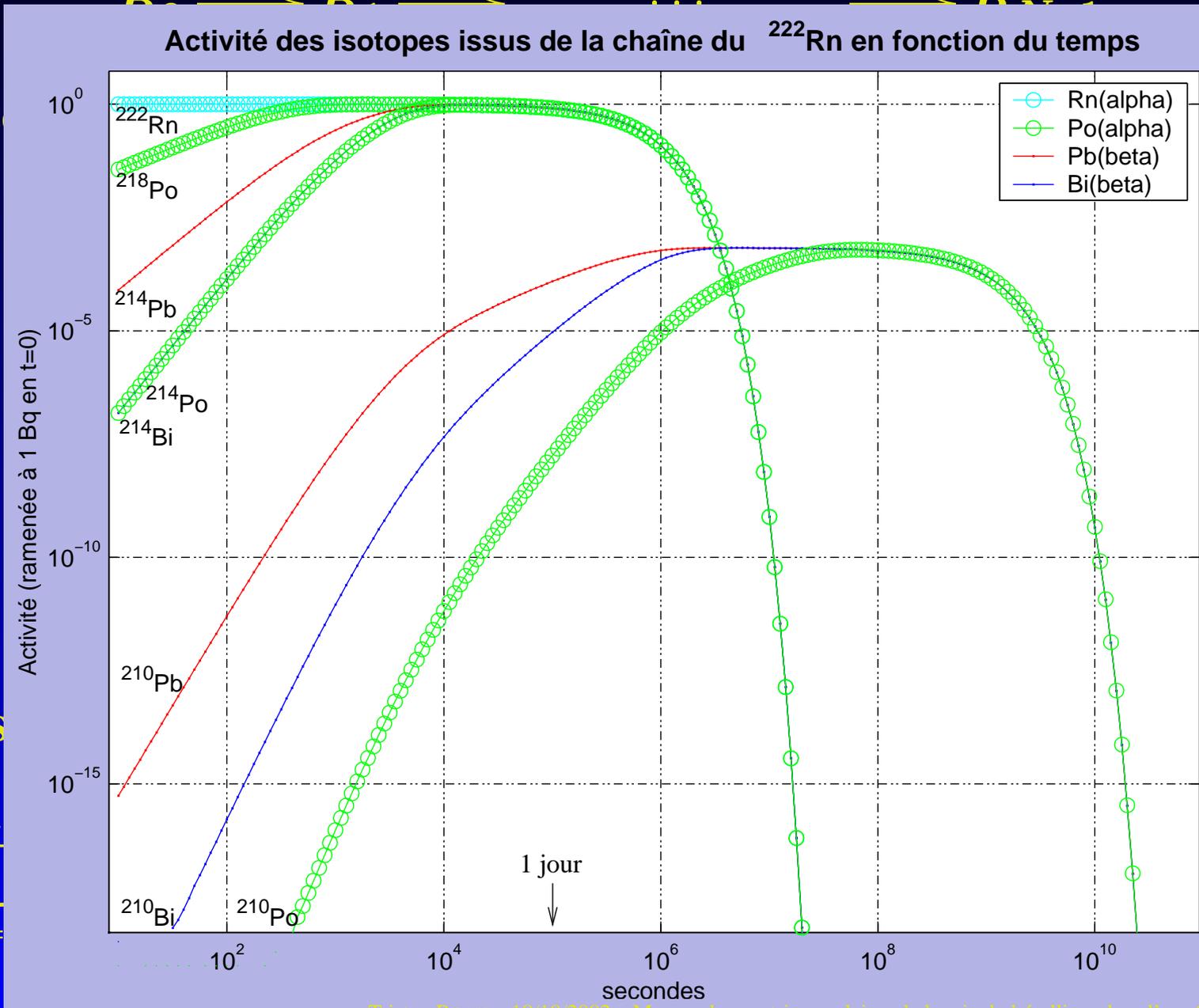
$$[R_i] = \sum_{j=1}^i$$



$$K_{ji}, K_{00} = [L$$

Activité d'une chaîne

$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow \dots \rightarrow R_n$



Avec le s

qui se rés

$$[R_i] = \sum_{j=1}^i$$

$$K_{ji}, K_{00} = [L$$

Activité d'une chaîne

Cas d'une chaîne à l'équilibre, $\tau_0 \gg \tau_{i>0}$. Alors

$$\frac{d[R_0]}{dt} = \frac{d[R_i]}{dt}, \quad \forall i,$$

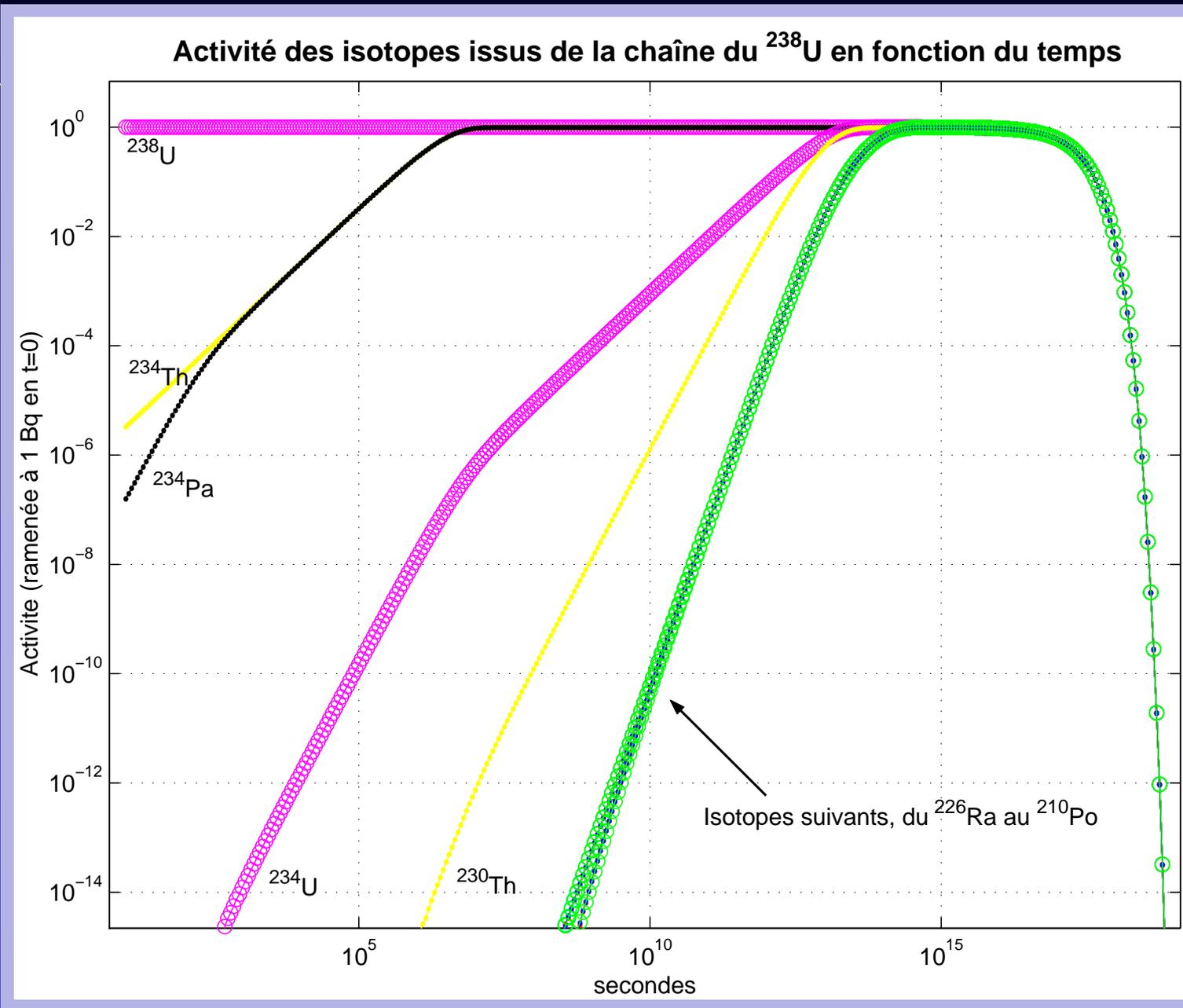
et donc

$$[R_0] = [R_0]^0 e^{-t/\tau_0} \text{ et } [R_i] = \frac{\tau_i}{\tau_0} [R_0]$$

Activité d'une chaîne

Cas d'u

et donc



Activité d'une chaîne

Cas d'une chaîne à l'équilibre, $\tau_0 \gg \tau_{i>0}$. Alors

$$\frac{d[R_0]}{dt} = \frac{d[R_i]}{dt}, \quad \forall i,$$

et donc

$$[R_0] = [R_0]^0 e^{-t/\tau_0} \text{ et } [R_i] = \frac{\tau_i}{\tau_0} [R_0]$$

Activité d'une chaîne

Cas d'une chaîne à l'équilibre, $\tau_0 \gg \tau_{i>0}$. Alors

$$\frac{d[R_0]}{dt} = \frac{d[R_i]}{dt}, \quad \forall i,$$

et donc

$$[R_0] = [R_0]^0 e^{-t/\tau_0} \text{ et } [R_i] = \frac{\tau_i}{\tau_0} [R_0]$$

Chaîne équilibrée + **Activité d'un radioisotope (e.g. Bi)**

Activité d'une chaîne

Cas d'une chaîne à l'équilibre, $\tau_0 \gg \tau_{i>0}$. Alors

$$\frac{d[R_0]}{dt} = \frac{d[R_i]}{dt}, \quad \forall i,$$

et donc

$$[R_0] = [R_0]^0 e^{-t/\tau_0} \text{ et } [R_i] = \frac{\tau_i}{\tau_0} [R_0]$$

Chaîne équilibrée + Activité d'un radioisotope (e.g. Bi)

Mesure de $[R_0]$

Application aux BiPo

On montre que la contamination est $c_{R_0} = \frac{\rho \cdot \tau \cdot M_0}{N_A \cdot m_{sc}}$

En particulier, dans le cas de chaînes de ${}^{232}_{90}\text{Th}$ et ${}^{238}_{92}\text{U}$ équilibrées, on montre que :

- $c_{{}^{232}_{90}\text{Th}}$ (1 coup BiPo 212/j/t) = $2,8 \cdot 10^{-15}$ g/g

Application aux BiPo

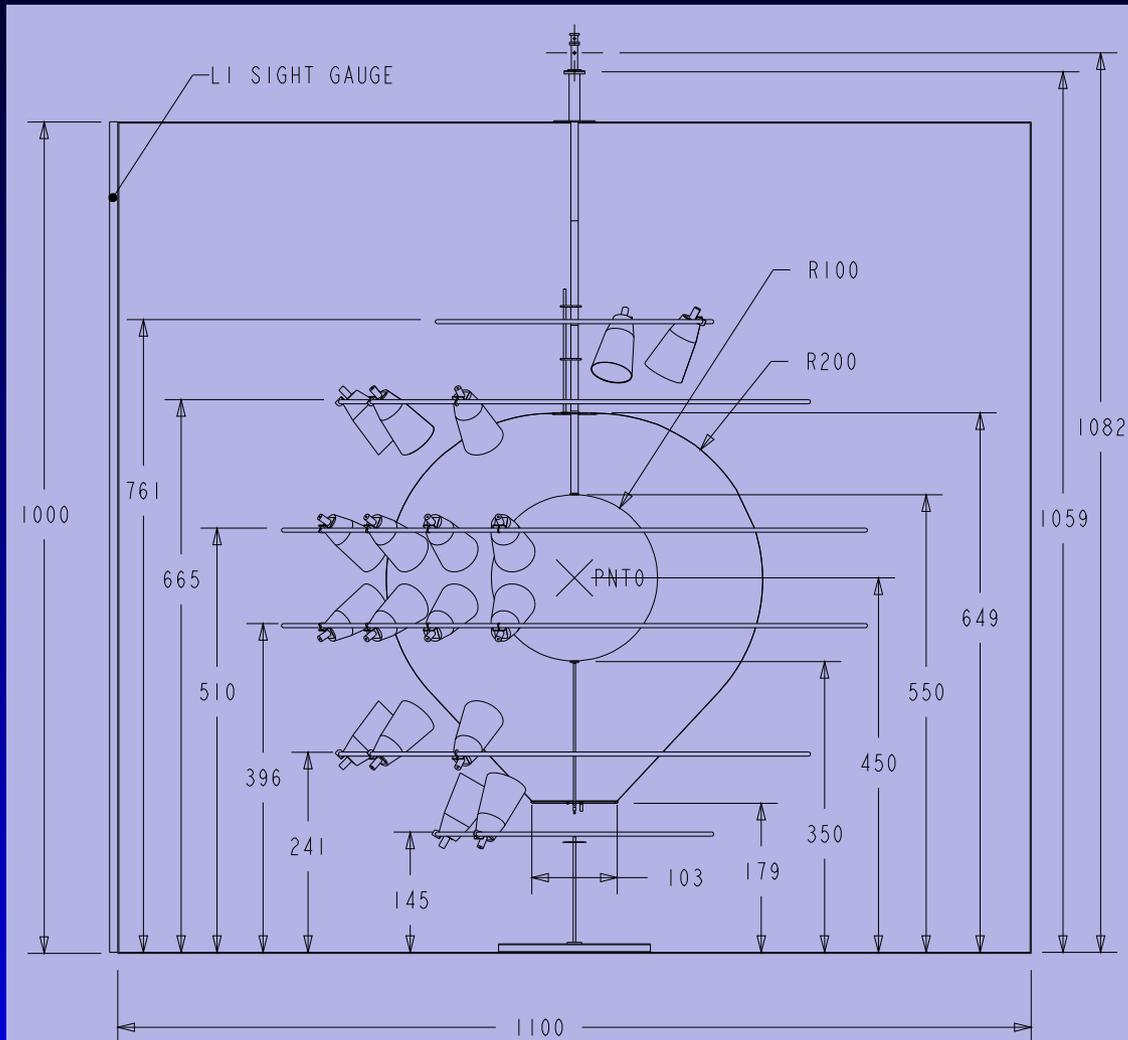
On montre que la contamination est $c_{R_0} = \frac{\rho \cdot \tau \cdot M_0}{N_A \cdot m_{sc}}$

En particulier, dans le cas de chaînes de ${}^{232}_{90}\text{Th}$ et ${}^{238}_{92}\text{U}$ équilibrées, on montre que :

- $c_{{}^{232}_{90}\text{Th}}$ (1 coup BiPo 212/j/t) = $2,8 \cdot 10^{-15}$ g/g
- $c_{{}^{238}_{92}\text{U}}$ (1 coup BiPo 214/j/t) = $9,4 \cdot 10^{-16}$ g/g

CTF, le “Counting Test Facility”

CTF, le “Counting Test Facility”



CTF-2 BASIC DIMENSIONS
ALL DIMENSIONS REFERENCED TO FLOOR OF BLUE TANK
ALL DIMENSIONS IN CM

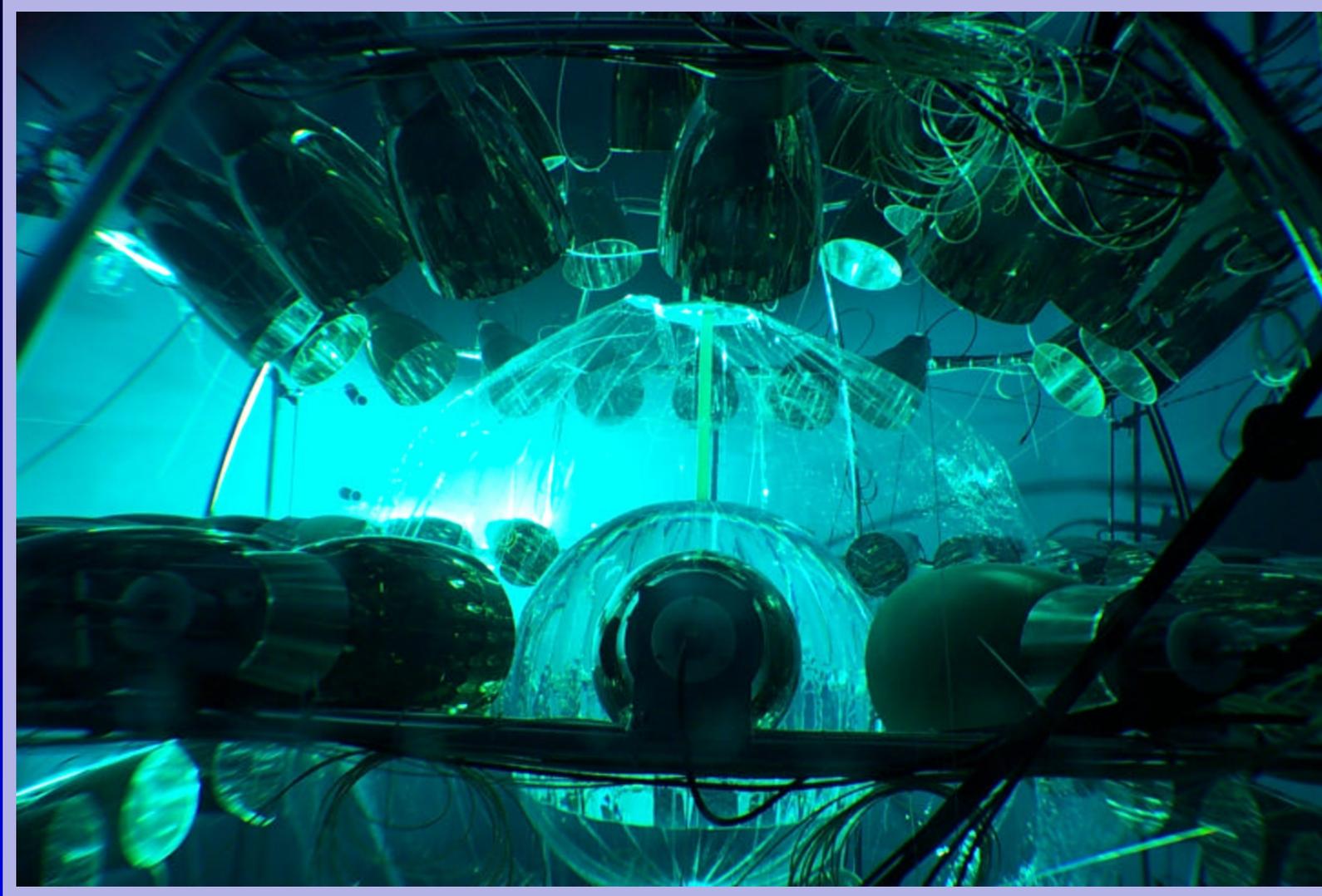
- 100 PM vers la cible
- cible de 4 m³
- voile anti-radon
- 16 PM veto μ
- le tout dans 1000 t d'eau

– CTF I, 1995–96

3 phases de CTF : – CTF II, 2000

– CTF III, 2001–

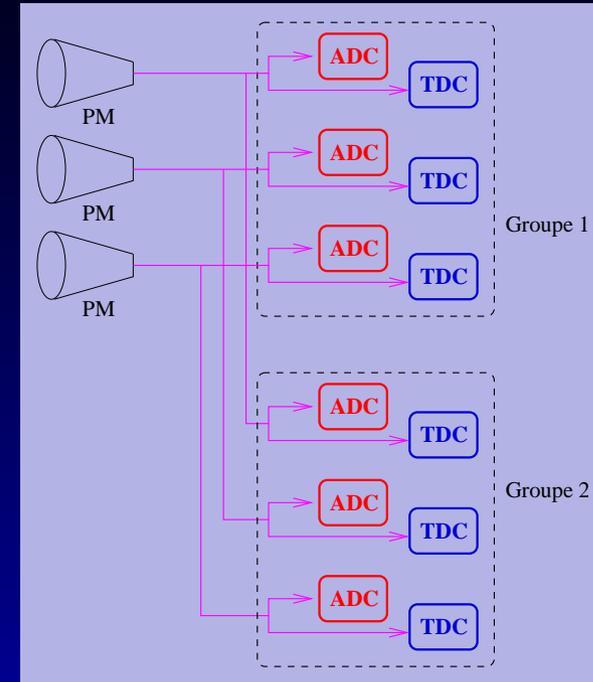
CTF, le “Counting Test Facility”



Électronique d'acquisition

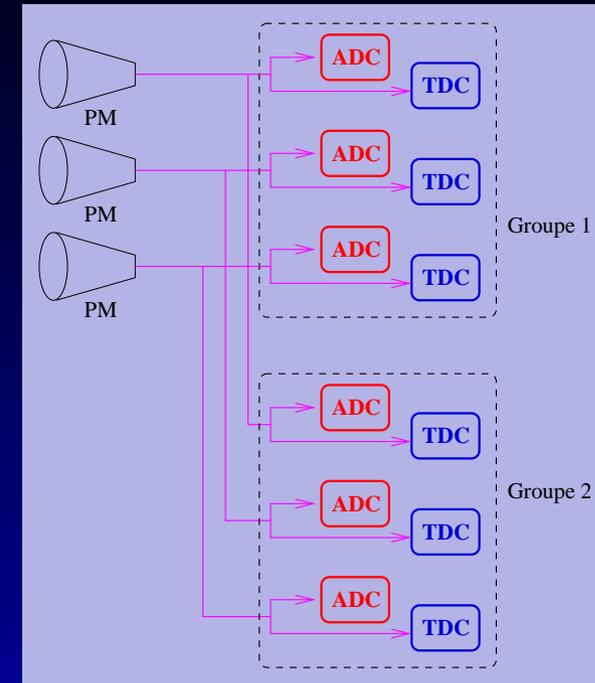
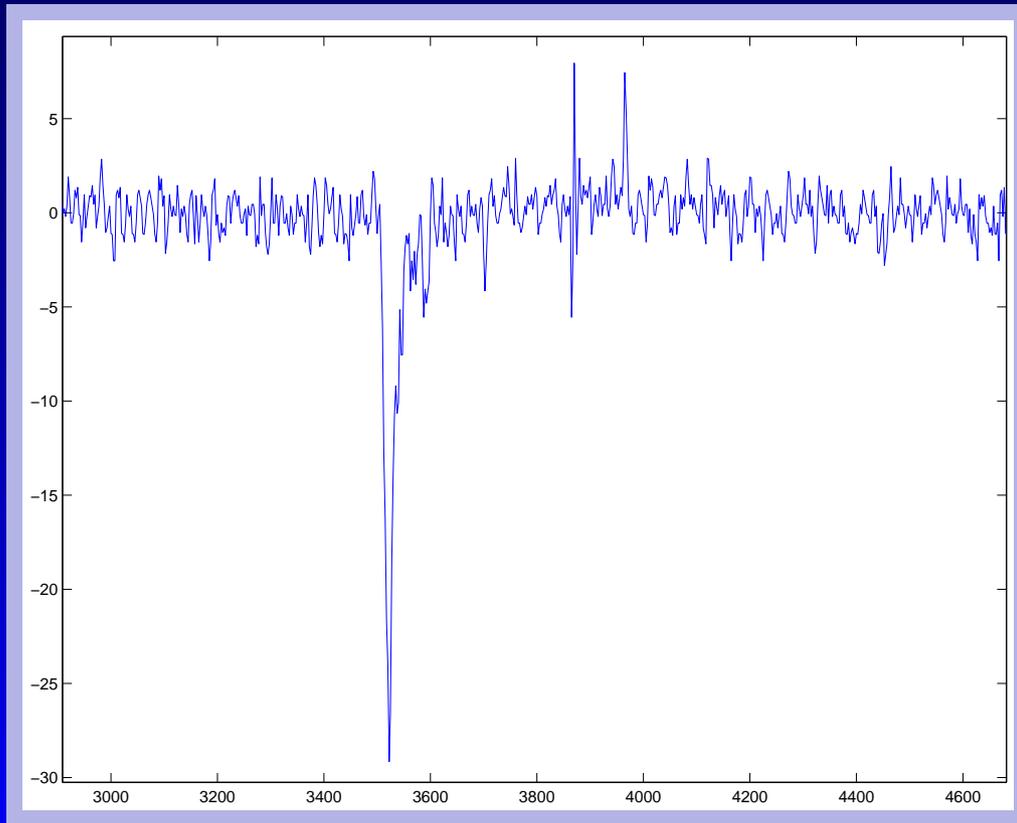
Électronique d'acquisition

Système standard (ElecM), avec trigger par multiplicité



Électronique d'acquisition

Systeme standard (ElecM), avec trigger par multiplicité

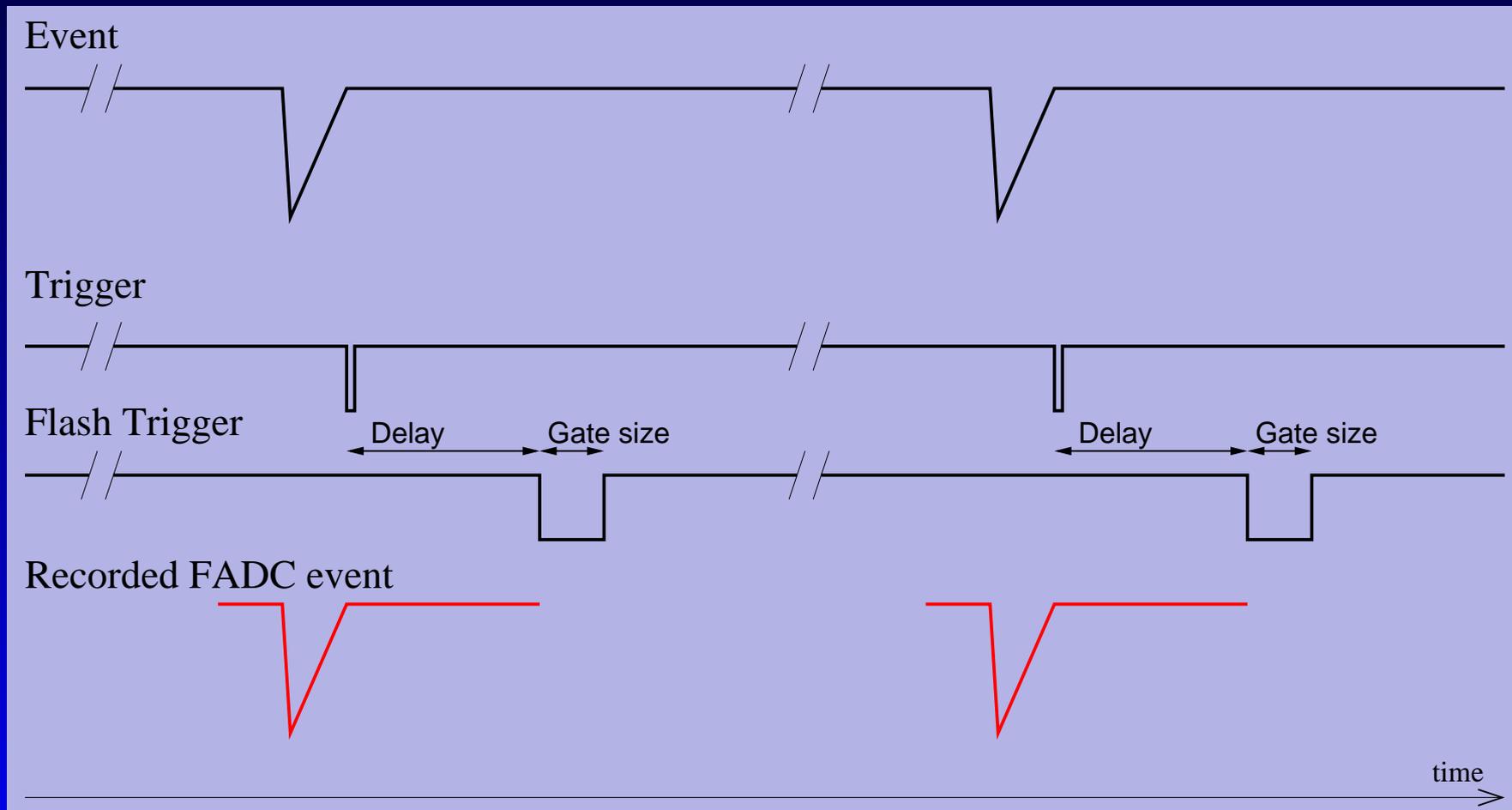


Systeme à base de FADC (Flash ADC), à partir de CTF II

- **Mesure sans temps mort**
- **Test cartes, acquisition**
- **Affiner les mesures ?**

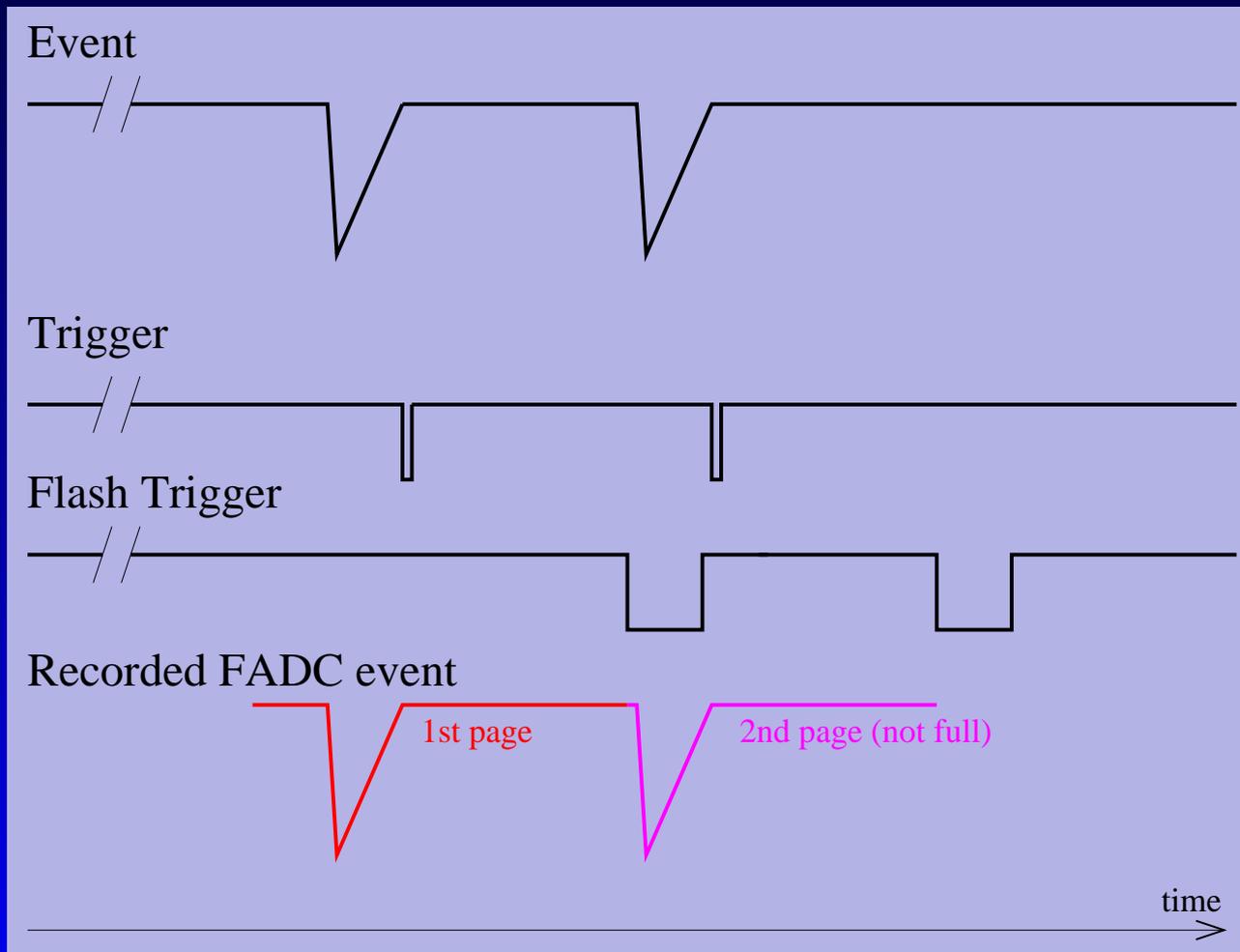
Numérisation par le v896

La numérisisation a lieu en continu dans une mémoire circulaire d'une page.



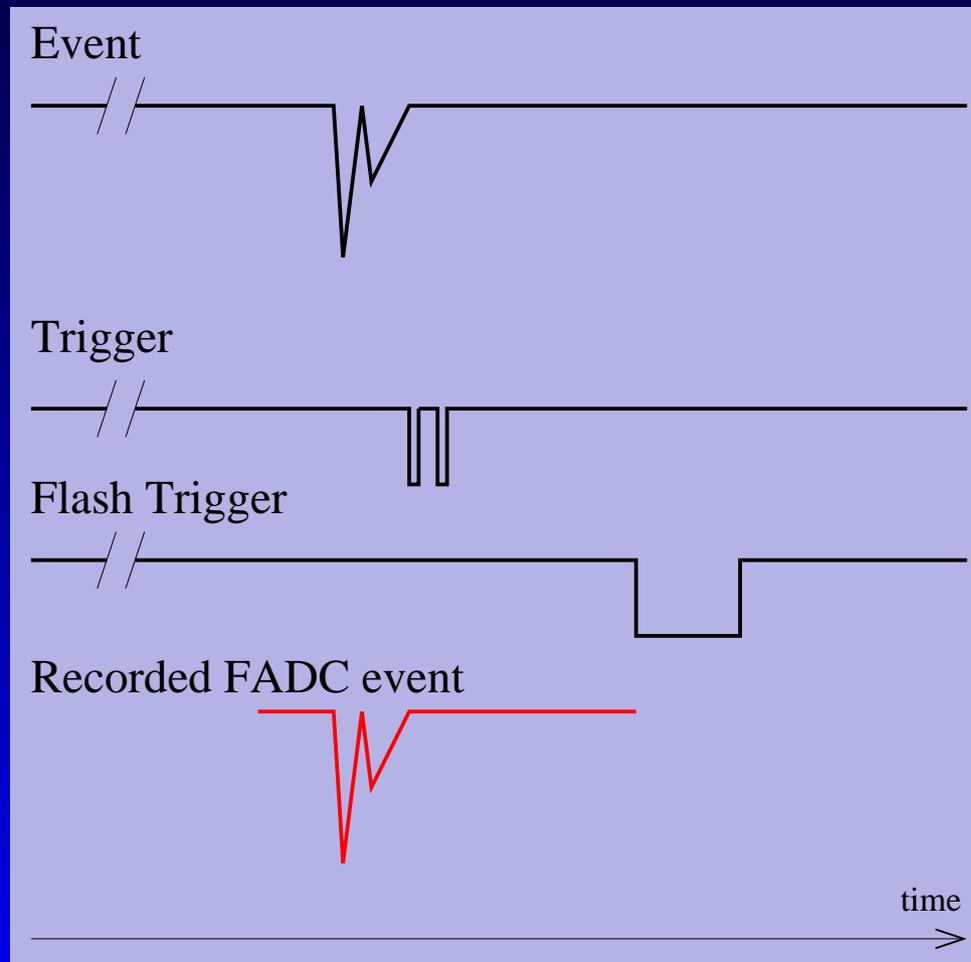
Numérisation par le v896

La numérisisation a lieu en continu dans une mémoire circulaire d'une page.

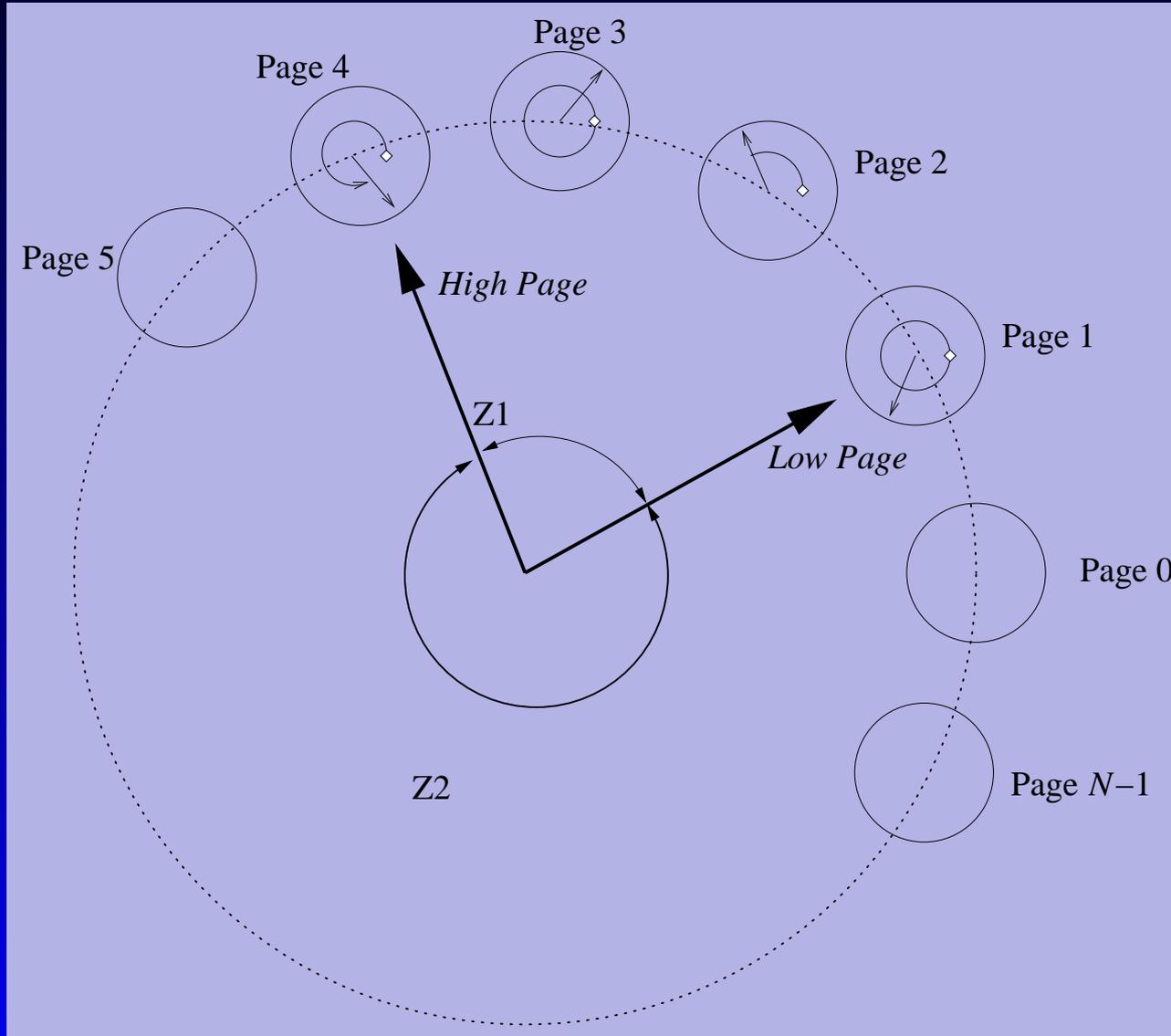


Numérisation par le v896

La numérisisation a lieu en continu dans une mémoire circulaire d'une page.

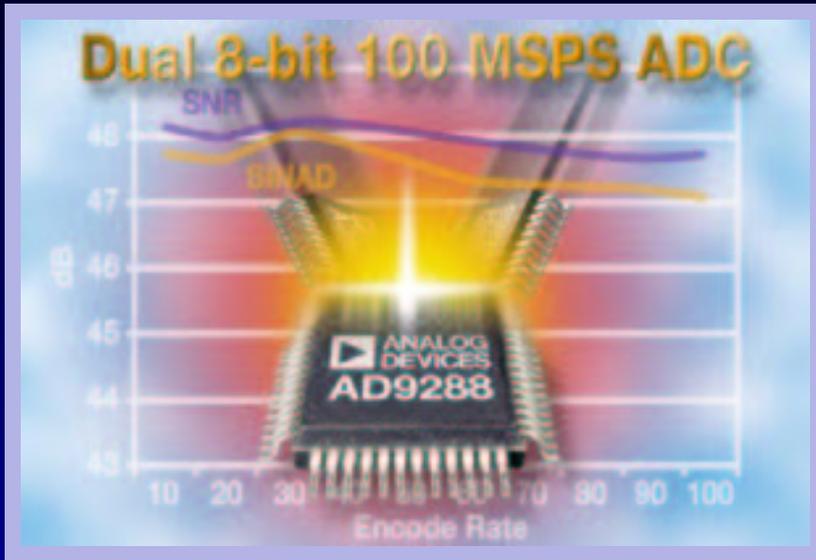


Gestion de la mémoire



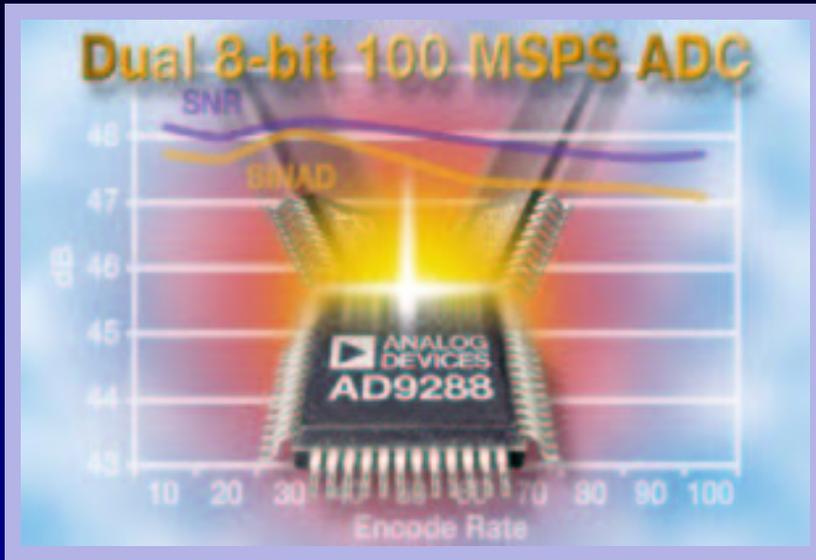
v896 : un FADC à 400 MHz

v896 : un FADC à 400 MHz



**Numérisation par le
AD9288 d'Analog Devices,
FADC à 100 MHz.**

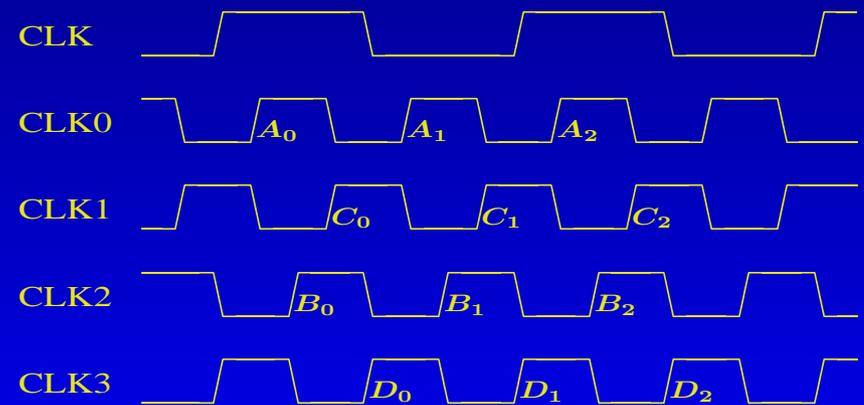
v896 : un FADC à 400 MHz



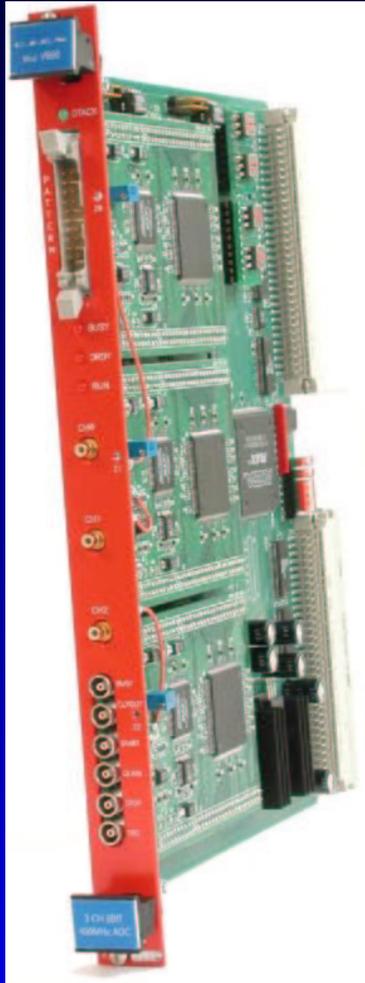
Numérisation par le
AD9288 d'Analog Devices,
FADC à 100 MHz.

FADC à 400 MHz = 4 FADC
à 100 MHz.

50 MHz → 4×100 MHz
("roboclock" CY7B9911 de
Cypress)

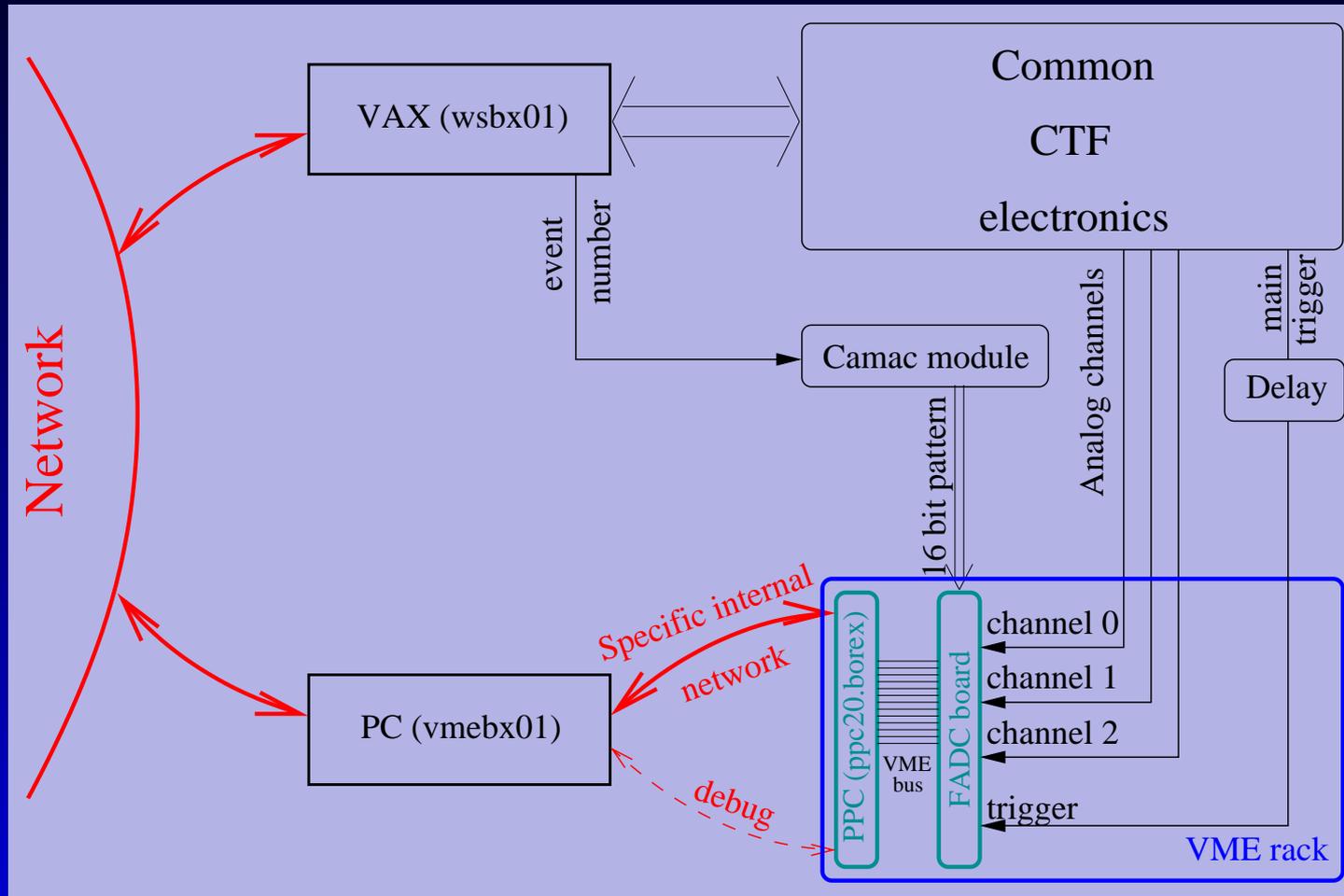


FADC CAEN v896

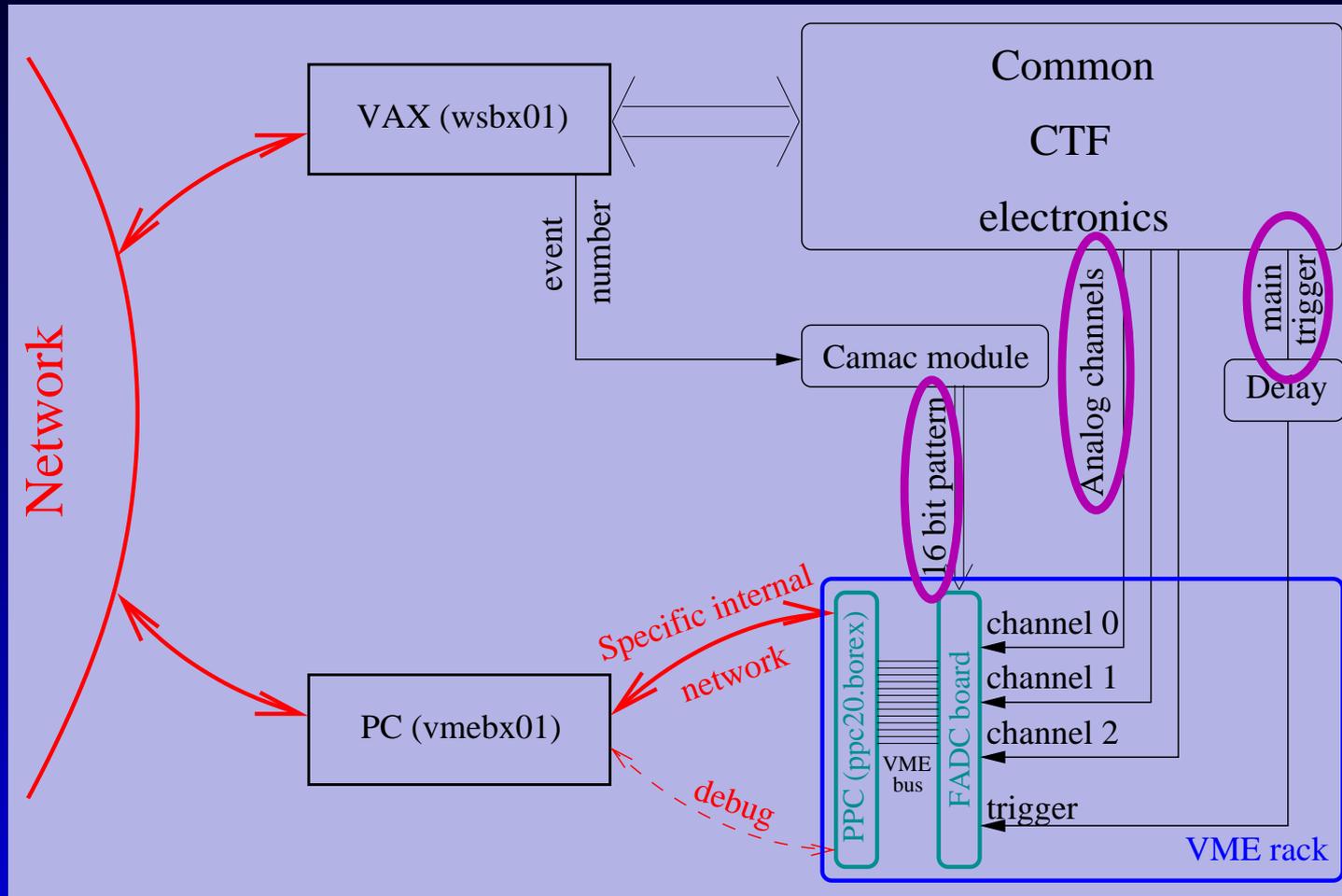


- **3 entrées indépendantes**
- **numérisation à 400 MHz, sur 8 bits, dans une plage de 0,5 V**
- **réglage de la tension de décalage entre $[-0,5 \text{ V}; 0,5 \text{ V}]$**
- **256 ko par voie, *i.e.* $655,36 \mu\text{s}$ enregistrable, découpées en 2^N “pages”**
- **enregistrement d’un mot de 16 bits par événement**
- **fonctionnement sur bus VME**
- **pas de temps mort tant que la mémoire n’est pas saturée**

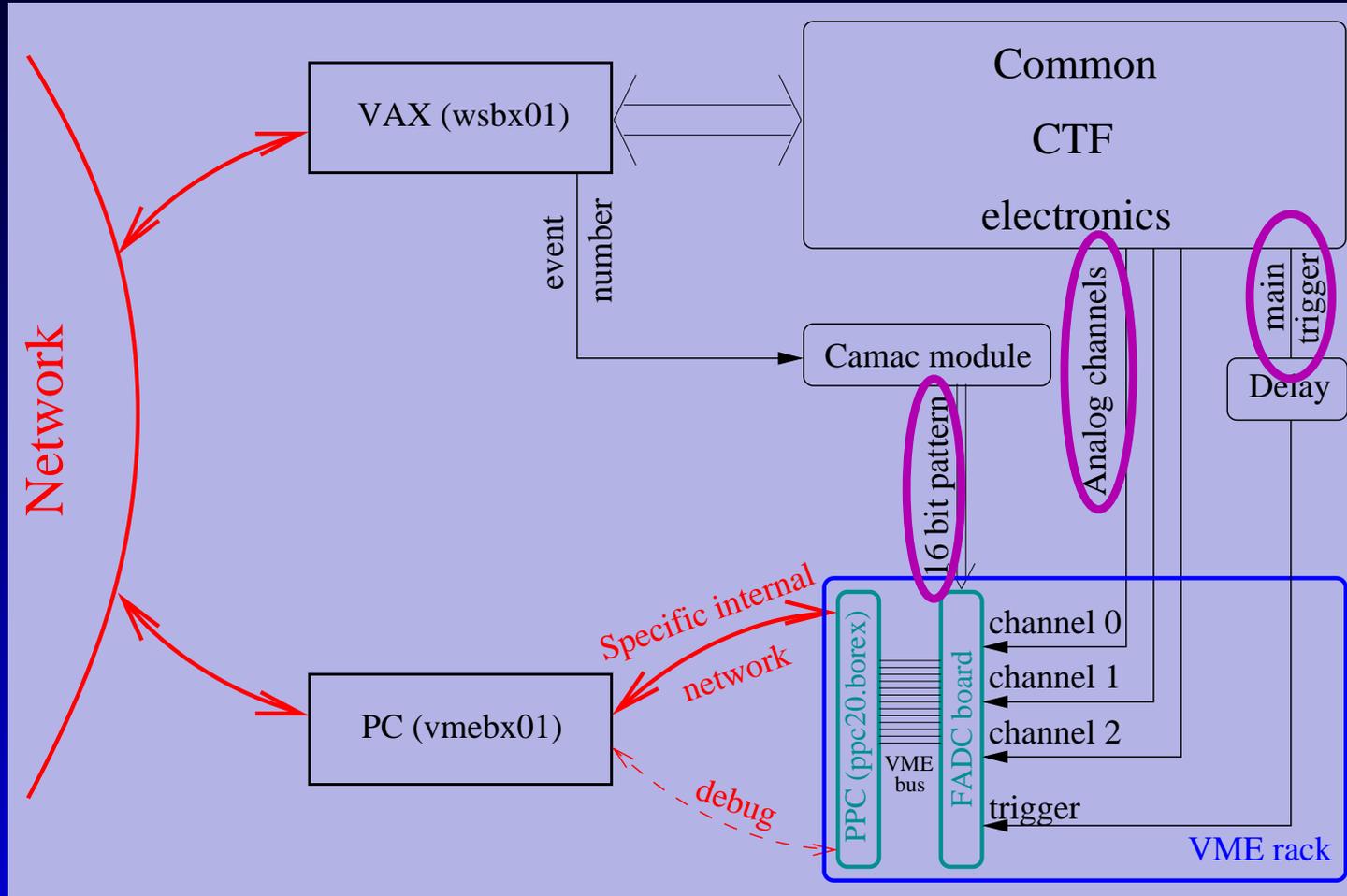
Implantation du FADC dans CTF II



Implantation du FADC dans CTF II



Implantation du FADC dans CTF II



► Le code d'analyse reconstruit les correspondances.

Acquisition des données FADC

Logiciel d'acquisition écrit pour CTF et Borexino.

Acquisition des données FADC

Logiciel d'acquisition écrit pour CTF et Borexino.

Les contraintes :

- Un événement de 10,24 microsecondes crée 4 ko de données par voie;
- Il y aura 99 voies de FADC sur Borexino (numérisation par 24 PM);
- Le taux de *trigger* est de 50 évts/s.

Acquisition des données FADC

Logiciel d'acquisition écrit pour CTF et Borexino.

Les contraintes :

- Un événement de 10,24 microsecondes crée 4 ko de données par voie;
- Il y aura 99 voies de FADC sur Borexino (numérisation par 24 PM);
- Le taux de *trigger* est de 50 évts/s.

⇒ 20 Mo/s, soit près de 20 To/j !

Acquisition des données FADC

Logiciel d'acquisition écrit pour CTF et Borexino.

Les contraintes :

- Un événement de 10,24 microsecondes crée 4 ko de données par voie;
- Il y aura 99 voies de FADC sur Borexino (numérisation par 24 PM);
- Le taux de *trigger* est de 50 évts/s.

⇒ 20 Mo/s, soit près de 20 To/j !

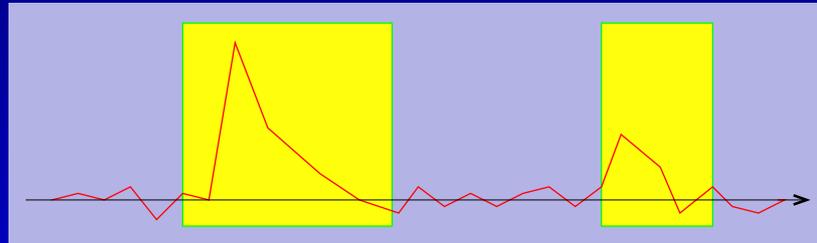
Il faut un algorithme de réduction des données

Réduction des données

Algorithme qui permet de conserver :

- Les événements suffisamment énergétiques
- Les événements en coïncidence pour lesquels le *second* événement est suffisamment énergétique

En outre, est implanté un *zero suppress*, pour ne conserver que les “tranches” où il y a un signal :



Campagnes de CTF

Campagnes de CTF

⇒ **CTF I, 1995–96**

Campagnes de CTF

⇒ CTF I, 1995–96

- Test de la faisabilité de Borexino, test du PC
- Nécessité d'un voile anti-radon
- Premières mesures extrêmement bas bruit de fond

Campagnes de CTF

⇒ CTF I, 1995–96

- Test de la faisabilité de Borexino, test du PC
- Nécessité d'un voile anti-radon
- Premières mesures extrêmement bas bruit de fond

⇒ CTF II, été 2000

Campagnes de CTF

⇒ CTF I, 1995–96

- Test de la faisabilité de Borexino, test du PC
- Nécessité d'un voile anti-radon
- Premières mesures extrêmement bas bruit de fond

⇒ CTF II, été 2000

- Mise à jour de CTF (100 PM contre 64, plus de voies d'acquisition)
- Test de la solution à base de PXE
- Première implantation du FADC (une voie pour le détecteur entier)

Campagnes de CTF

⇒ CTF I, 1995–96

- Test de la faisabilité de Borexino, test du PC
- Nécessité d'un voile anti-radon
- Premières mesures extrêmement bas bruit de fond

⇒ CTF II, été 2000

- Mise à jour de CTF (100 PM contre 64, plus de voies d'acquisition)
- Test de la solution à base de PXE
- Première implantation du FADC (une voie pour le détecteur entier)

⇒ CTF III, automne 2001 → maintenant

Campagnes de CTF

⇒ CTF I, 1995–96

- Test de la faisabilité de Borexino, test du PC
- Nécessité d'un voile anti-radon
- Premières mesures extrêmement bas bruit de fond

⇒ CTF II, été 2000

- Mise à jour de CTF (100 PM contre 64, plus de voies d'acquisition)
- Test de la solution à base de PXE
- Première implantation du FADC (une voie pour le détecteur entier)

⇒ CTF III, automne 2001 → maintenant

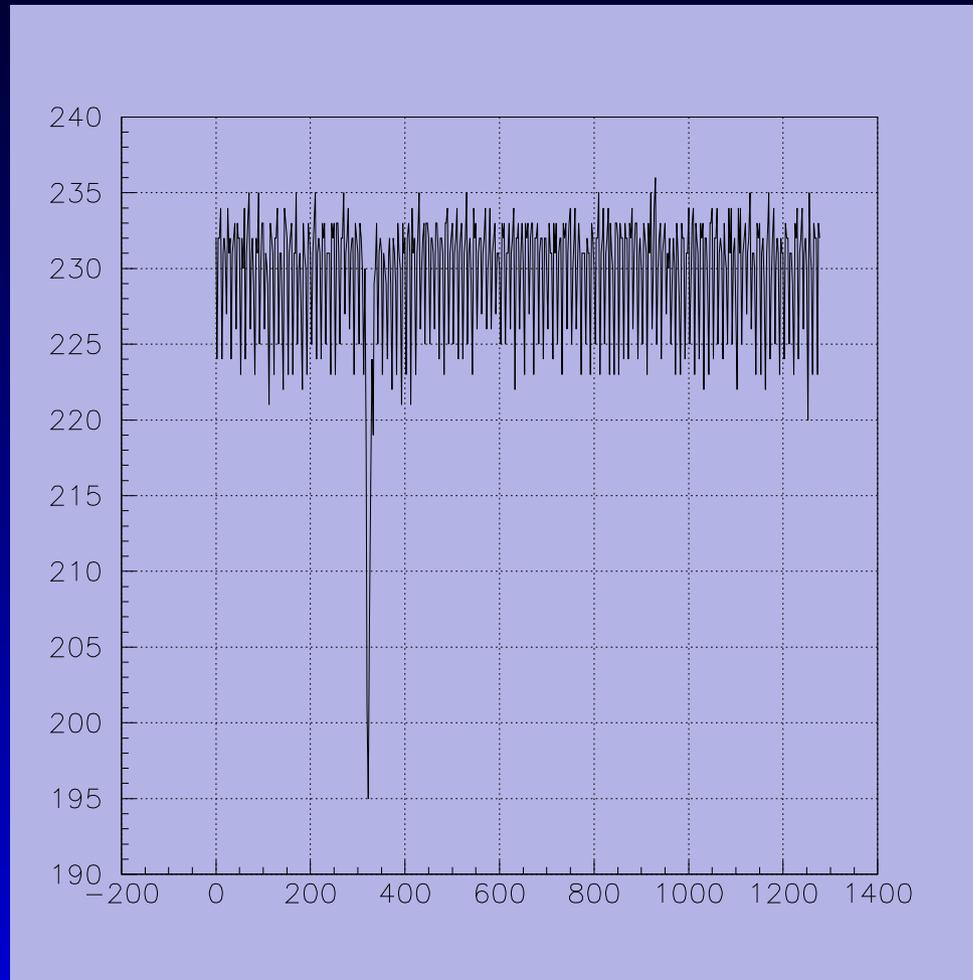
- Validation des procédures de purification
- Validation du PC à destination de Borexino
- Installation de FADC (12 voies actuellement) “à la Borexino”

③ Résultats sur le CTF

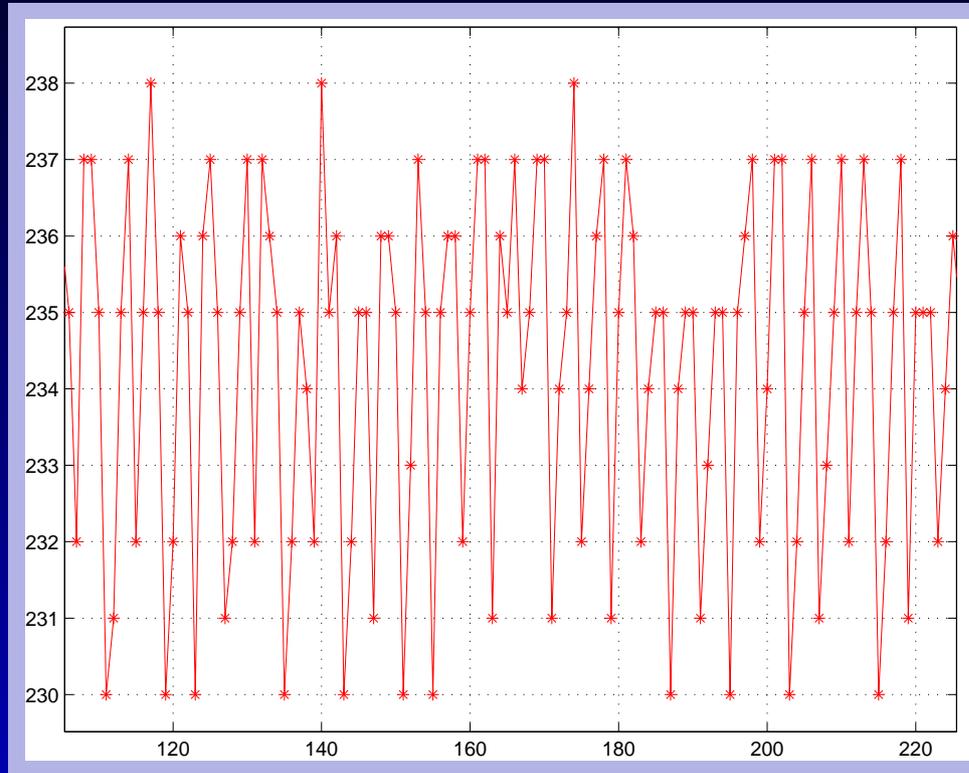
Résultats sur le CTF

Tests du FADC

Piédestaux du FADC

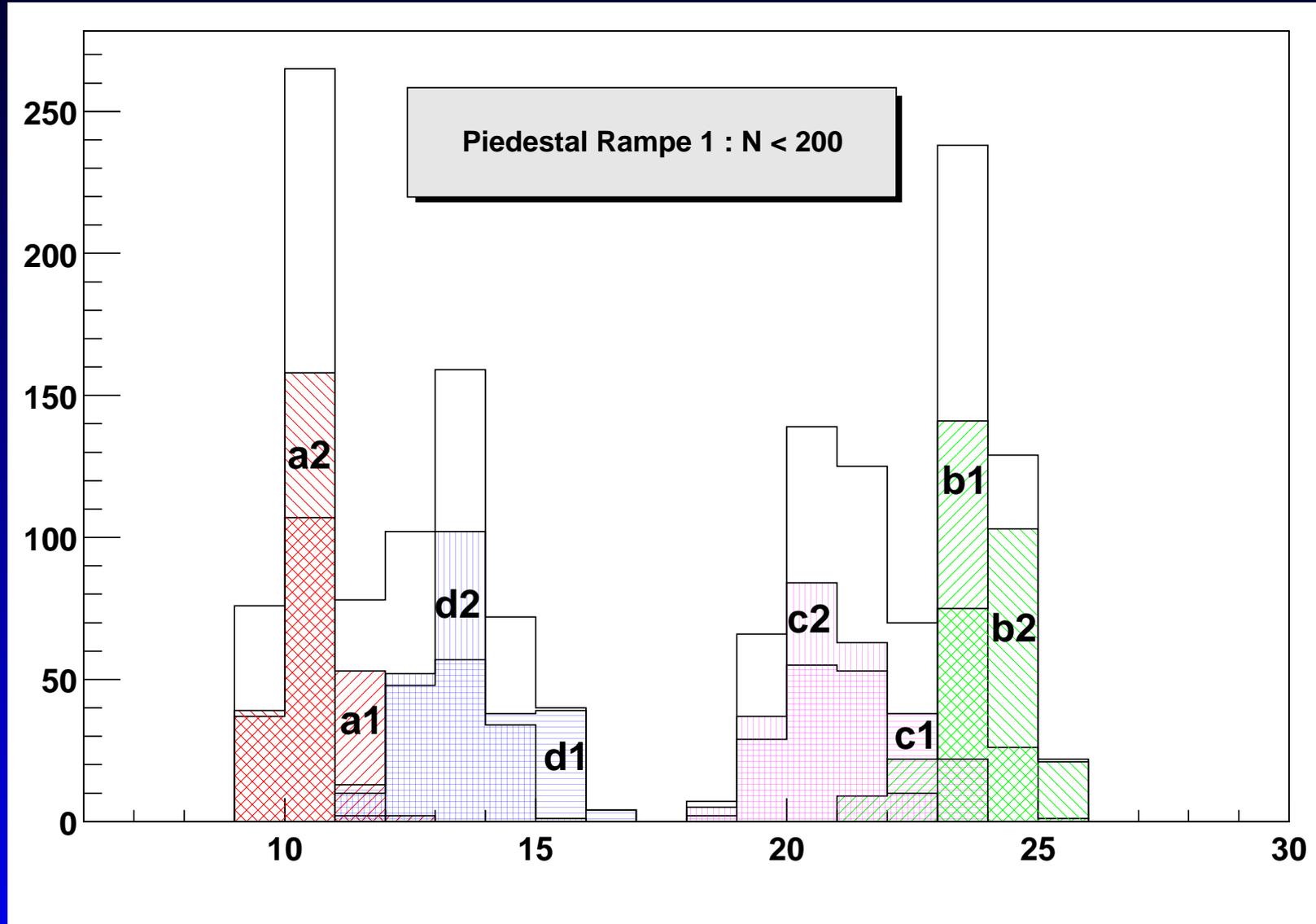


Piédestaux du FADC



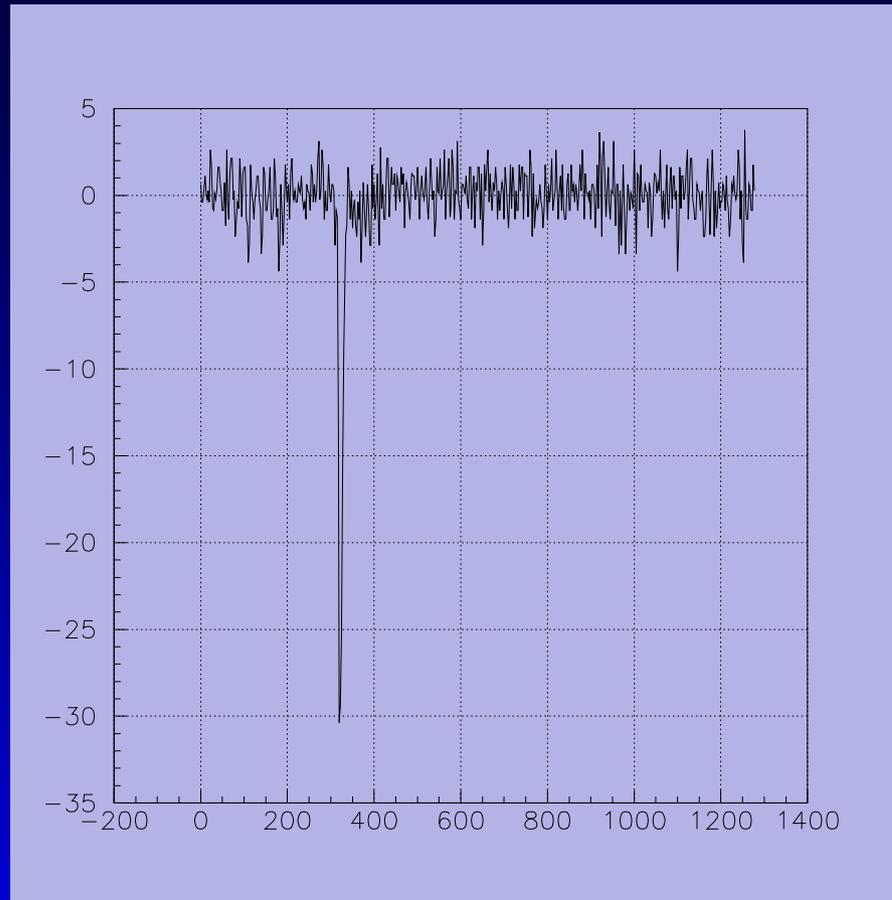
➔ **Nécessité de prendre en compte 8 piédestaux.**

Piédestaux du FADC



Piédestaux du FADC

Soustraction des piédestaux :



Bruit après soustraction des piédestaux ≤ 1 canal (2 mV).

Mesure de l'énergie avec FADC

Estimation de l'énergie par calcul de l'intégrale du signal.

On intègre ici sur 40 échantillons, soit 100 nanosecondes.

L'estimateur de l'énergie est : $\tilde{E} = \sum_{i=i_0}^{i_0+40} (a_i - p_{i[8]})$

où

- i_0 est le numéro de l'échantillon (l'instant) où commence l'impulsion
- a_i l'échantillon du signal
- les $p_{i[8]}$ représentent les 8 piédestaux

Mesure de l'énergie avec FADC

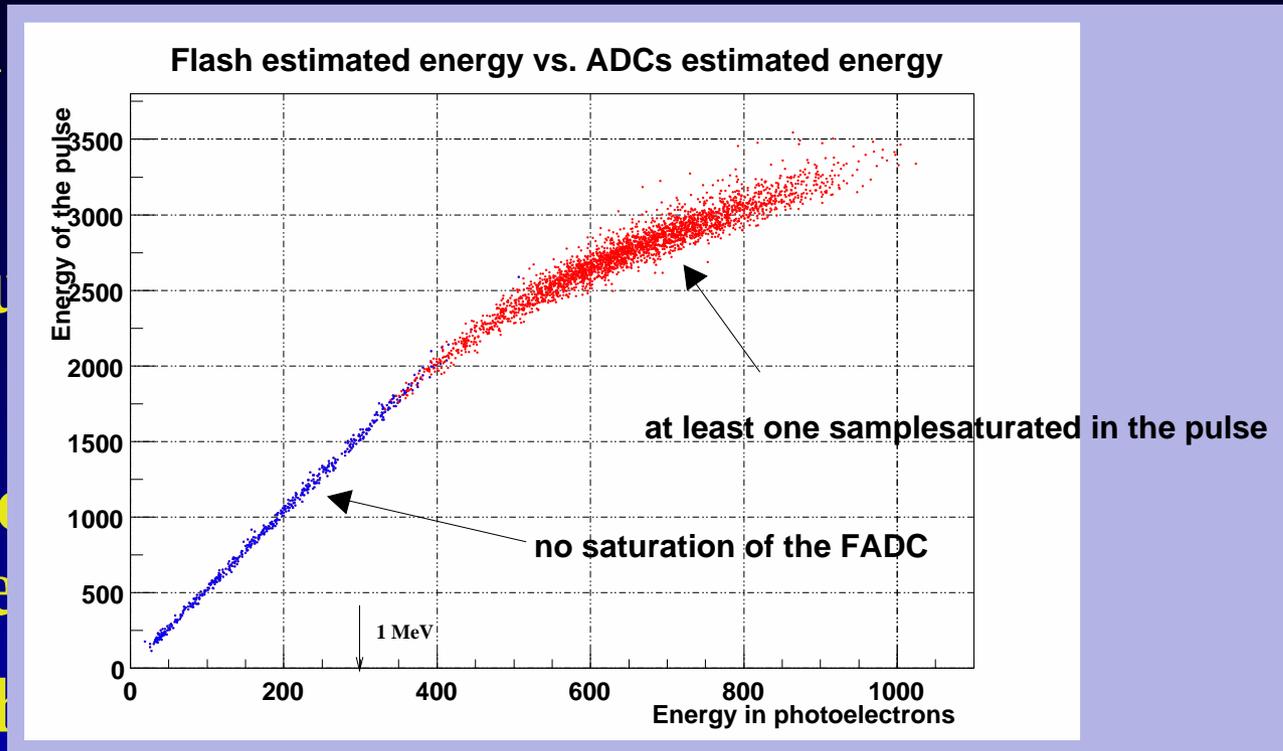
Estimation

On intègre

L'estimateur

où

- i_0 est le
- comme
- a_i l'éch
- les $p_{i[8]}$ représentent les 8 piédestaux



du signal.

condes.

$p_{i[8]}$

Mesure de l'énergie avec FADC

Estimation

On intègre

L'estimateur

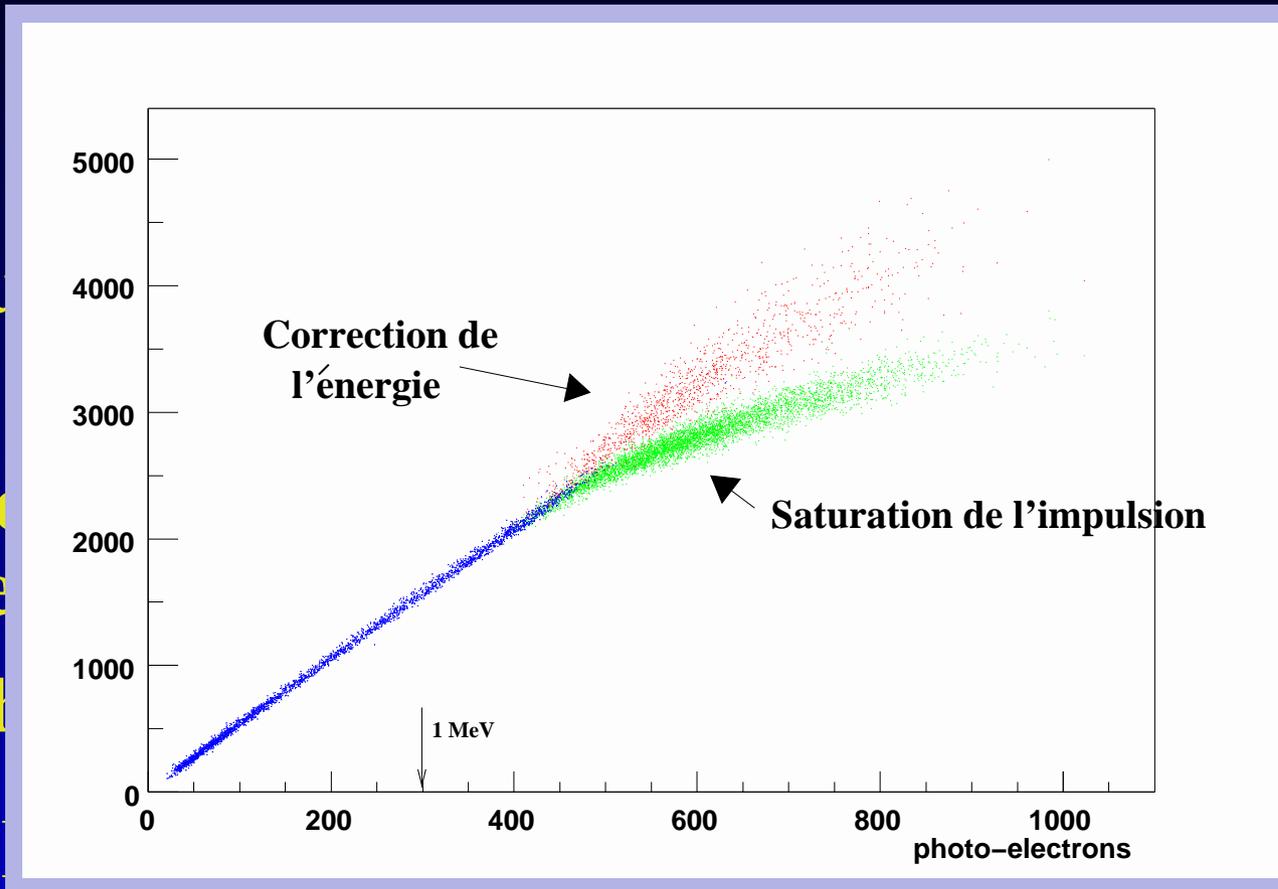
où

- i_0 est le
- comme
- a_i l'éch
- les $p_i[8]$

du signal.

condes.

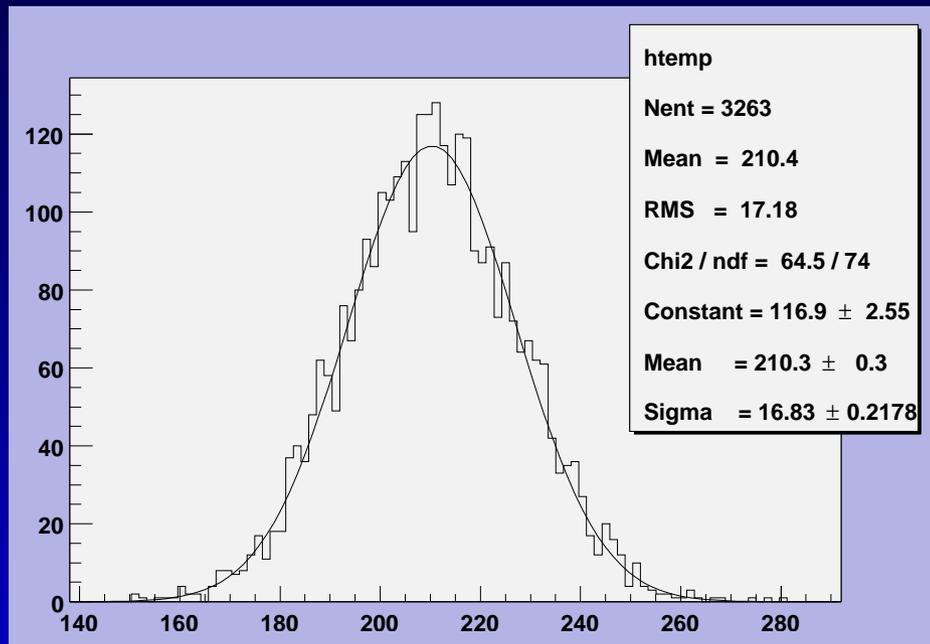
$p_i[8]$



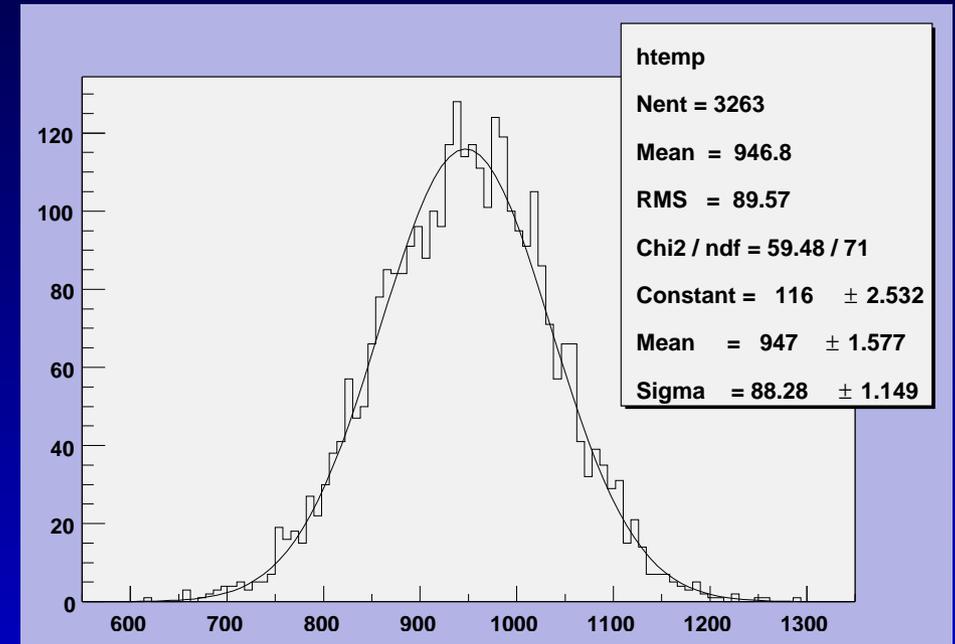
Résolution en énergie

Choix d'un lot d'événements monoénergétiques : α du BiPo 214.

Utilisation d'un *run* avec une source : 3265 événements sélectionnés.



(a) ElecM



(b) FADC

Résolution en énergie

- pour l'ElecM, $\left\{ \begin{array}{l} \text{Moy} = 210,3 \\ \sigma = 16,8 \end{array} \right.$ soit une résolution

$$\frac{\Delta E}{E} \Big|_{\text{ElecM}} = 8,0\%$$

- pour l'ElecP, $\left\{ \begin{array}{l} \text{Moy} = 947 \\ \sigma = 88 \end{array} \right.$ soit une résolution

$$\frac{\Delta E}{E} \Big|_{\text{FADC}} = 9,3\%$$

$\frac{\Delta E}{E} \Big|_{\text{FADC}} \geq \frac{\Delta E}{E} \Big|_{\text{ElecM}}$, mais 1 voie unique de FADC contre 100 ADC.

Résultats sur le CTF

Mesures des niveaux de contamination

BiPo 212 (chaîne du $^{232}_{90}\text{Th}$)

BiPo 212 (chaîne du $^{232}_{90}\text{Th}$)

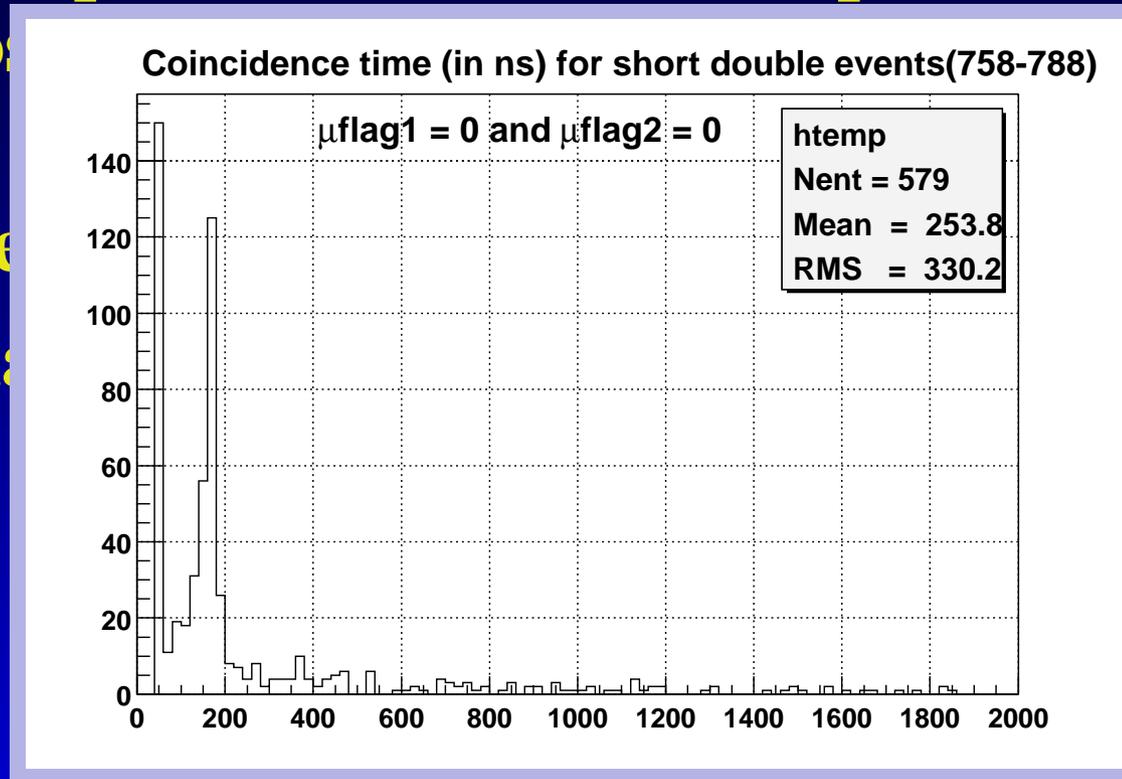
La sélection des événements doubles BiPo 212 se fait par :

- **test du temps de coïncidence (temps caractéristique de 450 nanosecondes)**
- **sélection d'un second événement monoénergétique autour de 8,95 MeV**
- **Pas de marquage muon**

BiPo 212 (chaîne du ^{232}Th)

La sélection des événements doubles BiPo 212 se fait par :

- test du temps de coïncidence (temps caractéristique de 450 nanos)
- sélection autour de
- Pas de m



gétique

BiPo 212 (chaîne du $^{232}_{90}\text{Th}$)

La sélection des événements doubles BiPo 212 se fait par :

- test du temps de coïncidence (temps caractéristique de 450 nanosecondes)
- sélection d'un second événement monoénergétique autour de 8,95 MeV
- Pas de marquage muon

D'où une efficacité

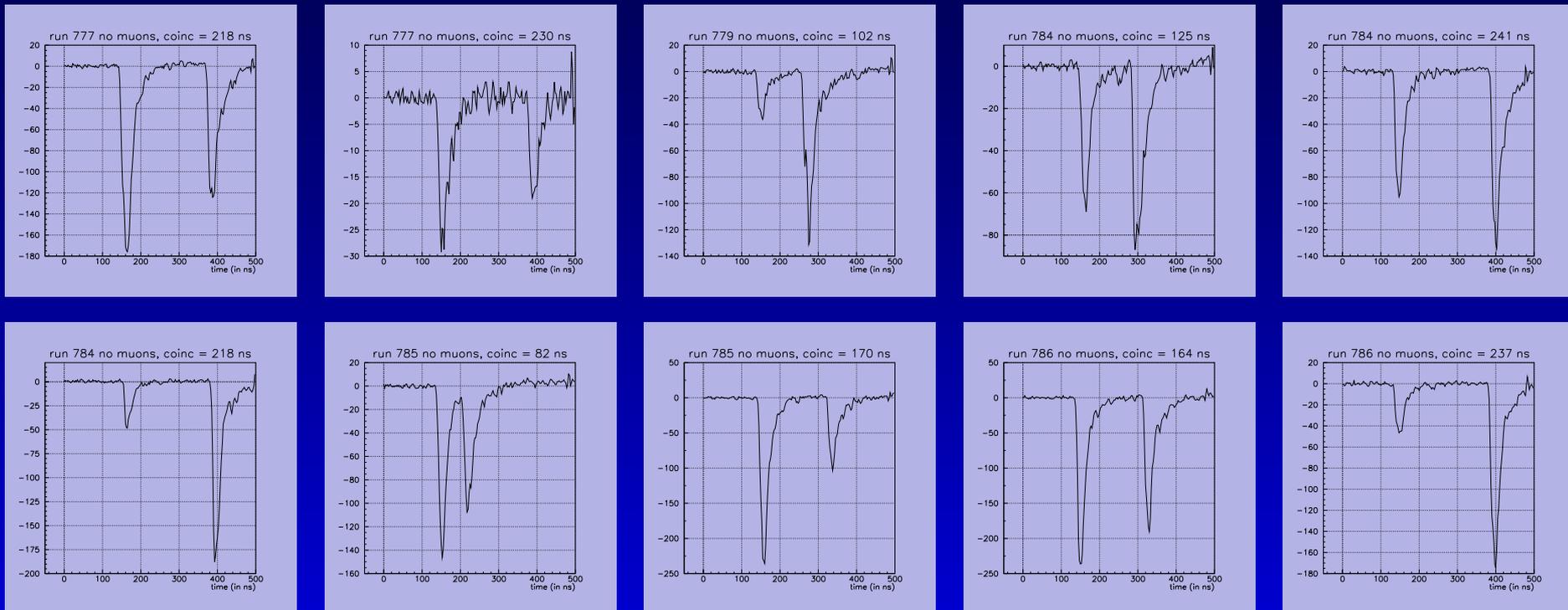
$$\text{eff}_{dt} (240 \text{ ns} < dt < 3 \mu\text{s}) = 58\%$$

Candidats BiPo 212 vus par le FADC

Pour CTF II nous ne disposons pas de tous les *runs*. Seuls sont disponibles les *runs* 777, 779, 784, 785, 786 (188 heures de fonctionnement de CTF II).

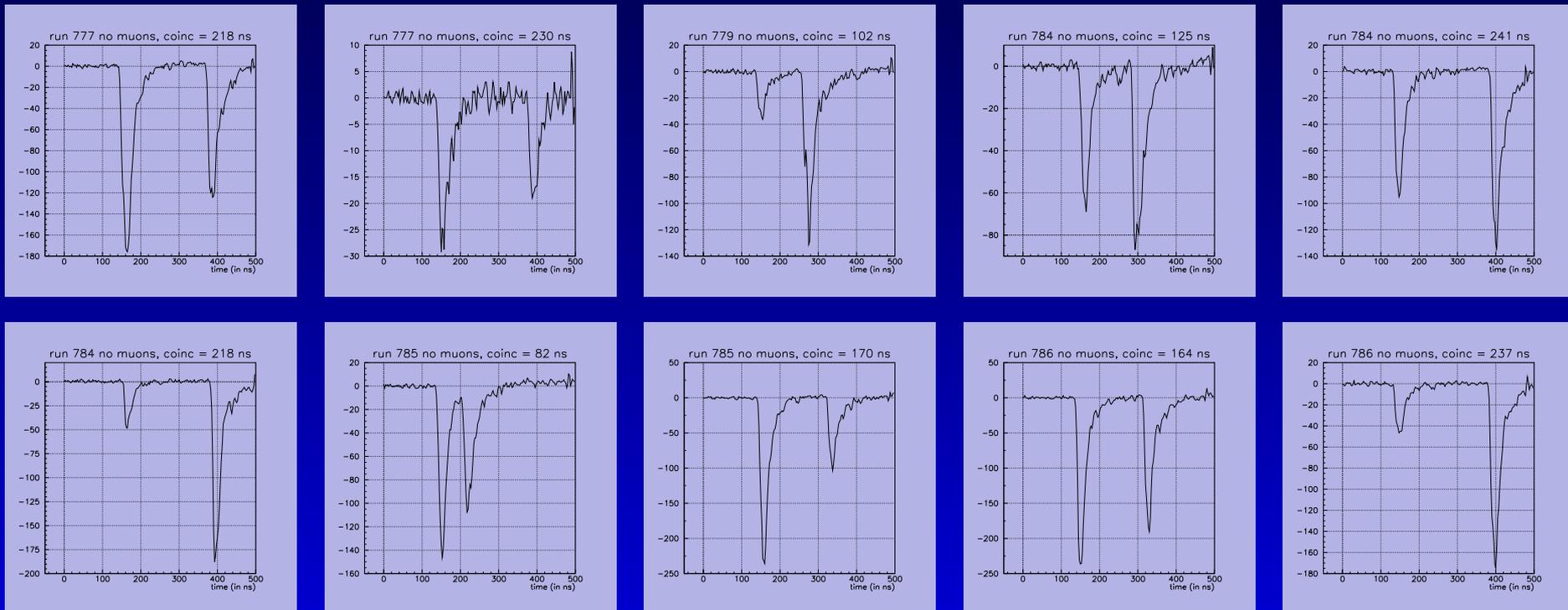
Candidats BiPo 212 vus par le FADC

Pour CTF II nous ne disposons pas de tous les *runs*. Seuls sont disponibles les *runs* 777, 779, 784, 785, 786 (188 heures de fonctionnement de CTF II).



Candidats BiPo 212 vus par le FADC

Pour CTF II nous ne disposons pas de tous les *runs*. Seuls sont disponibles les *runs* 777, 779, 784, 785, 786 (188 heures de fonctionnement de CTF II).



Ces 10 candidats ne permettent pas de justifier l'allure de l'histogramme des coïncidences.

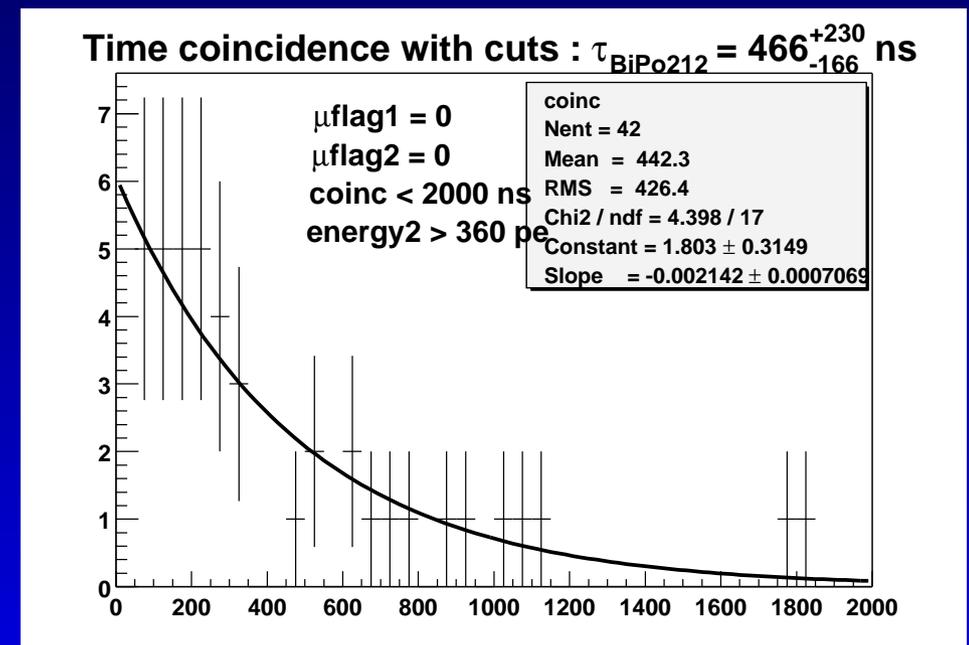
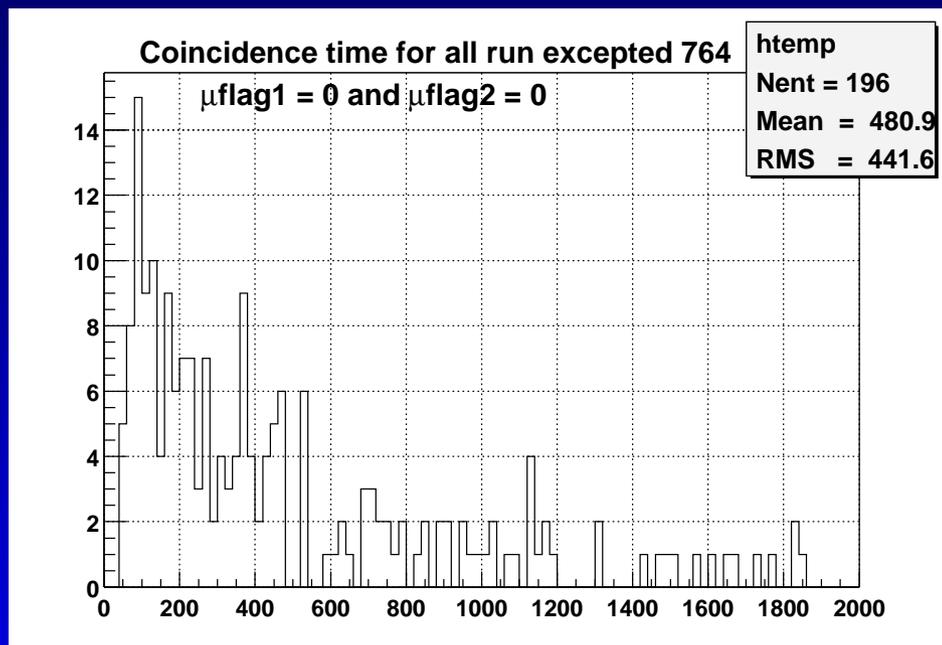
Révision de la sélection des BiPo 212

Sur les 775 heures disponibles à partir des seules données de l'électronique standard, on constate une aberration sur le *run764*.

Révision de la sélection des BiPo 212

Sur les 775 heures disponibles à partir des seules données de l'électronique standard, on constate une aberration sur le *run764*.

Après réjection nous obtenons :



Absence de marquage muon

Sélection finale

Révision de la sélection des BiPo 212

Soit la possibilité d'une nouvelle coupure en coïncidence
 $\text{eff}_{dt} (50 \text{ ns} < dt < 2 \mu\text{s}) = 88\%$.

Il vient :

$$\tau_{212_{83}\text{Bi}} = 466^{+230}_{-166} \text{ ns} (430 \pm 5 \text{ ns attendu})$$

Révision de la sélection des BiPo 212

Soit la possibilité d'une nouvelle coupure en coïncidence
 $\text{eff}_{dt} (50 \text{ ns} < dt < 2 \mu\text{s}) = 88\%$.

Il vient :

$$\tau_{83}^{212}\text{Bi} = 466_{-166}^{+230} \text{ ns} (430 \pm 5 \text{ ns attendu})$$

$$C_{90}^{232}\text{Th} = 3,8 \pm 0,6 \pm 0,2 \cdot 10^{-15} \text{ g/g} (10^{-16} \text{ g/g nominal})$$

On comparera à

$$\begin{aligned} C_{90}^{232}\text{Th} &= (3,9 \pm 4,3) \cdot 10^{-16} \text{ g/g} \text{ (run 773–780)} \\ &= (4,0 \pm 4,4) \cdot 10^{-16} \text{ g/g} \text{ (run 783–789)} \end{aligned}$$

avant cette analyse.

Sélection BiPo 214 (chaîne de l' $^{238}_{92}\text{U}$)

Sélection BiPo 214 (chaîne de l' $^{238}_{92}\text{U}$)

Nous effectuons les sélections :

- **énergie du groupe 2 entre 200 et 400 p.e.**
- **coïncidence entre événements entre 1 μs et 1 ms**
- **pas de marquage muon**

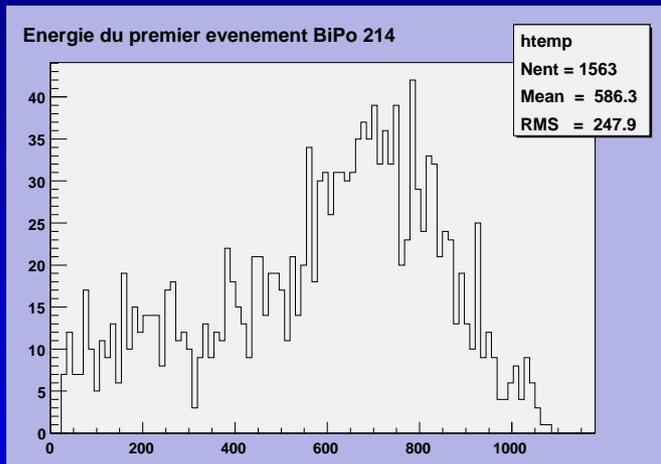
L'efficacité de ces coupures est de 98,3%.

Sélection BiPo 214 (chaîne de l' $^{238}_{92}\text{U}$)

Nous effectuons les sélections :

- énergie du groupe 2 entre 200 et 400 p.e.
- coïncidence entre événements entre $1 \mu\text{s}$ et 1ms
- pas de marquage muon

L'efficacité de ces coupures est de 98,3%.



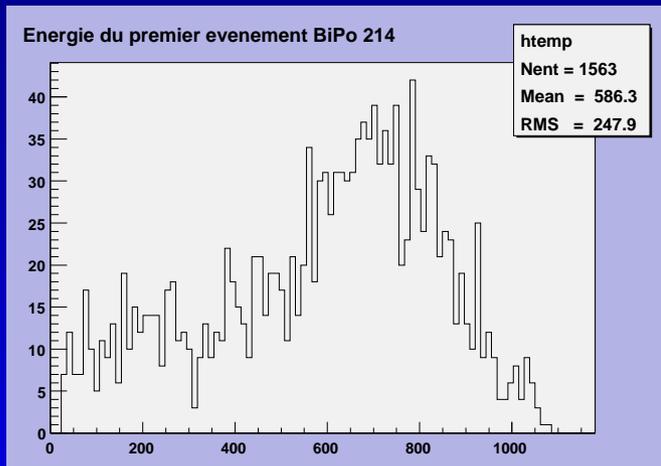
Énergie du β du $^{214}_{83}\text{Bi}$

Sélection BiPo 214 (chaîne de l' $^{238}_{92}\text{U}$)

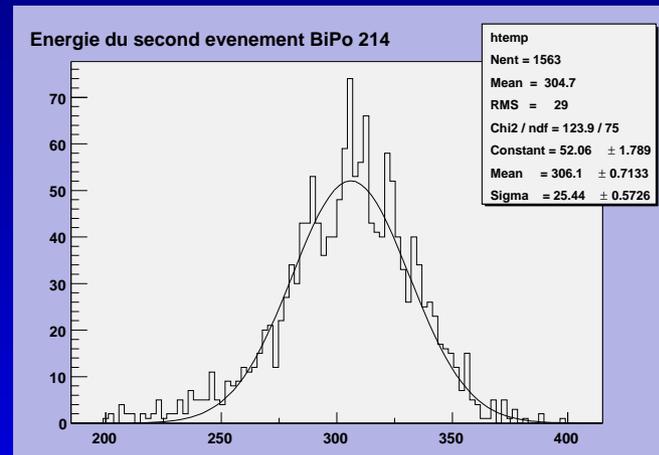
Nous effectuons les sélections :

- énergie du groupe 2 entre 200 et 400 p.e.
- coïncidence entre événements entre $1 \mu\text{s}$ et 1ms
- pas de marquage muon

L'efficacité de ces coupures est de 98,3%.



Énergie du β du $^{214}_{83}\text{Bi}$



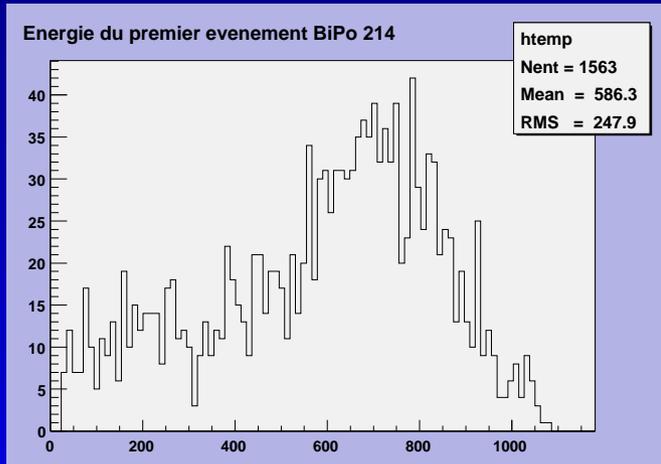
Énergie de l' α du $^{214}_{84}\text{Po}$

Sélection BiPo 214 (chaîne de l' $^{238}_{92}\text{U}$)

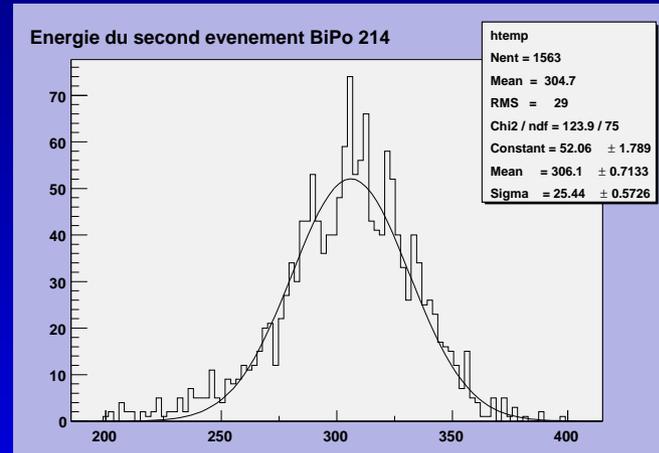
Nous effectuons les sélections :

- énergie du groupe 2 entre 200 et 400 p.e.
- coïncidence entre événements entre 1 μs et 1 ms
- pas de marquage muon

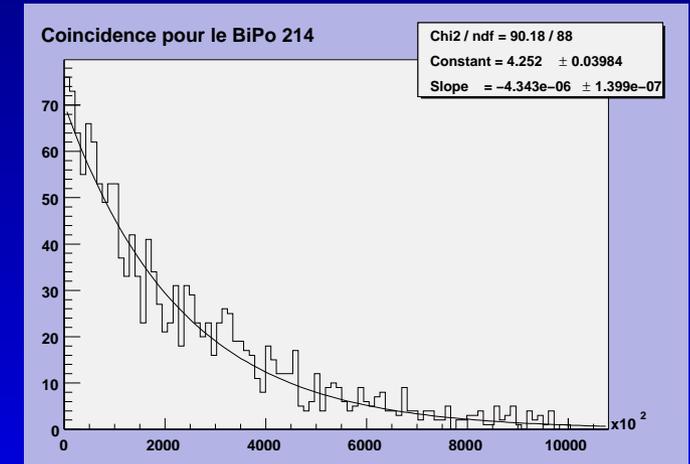
L'efficacité de ces coupures est de 98,3%.



Énergie du β du $^{214}_{83}\text{Bi}$



Énergie de l' α du $^{214}_{84}\text{Po}$



Coïncidence

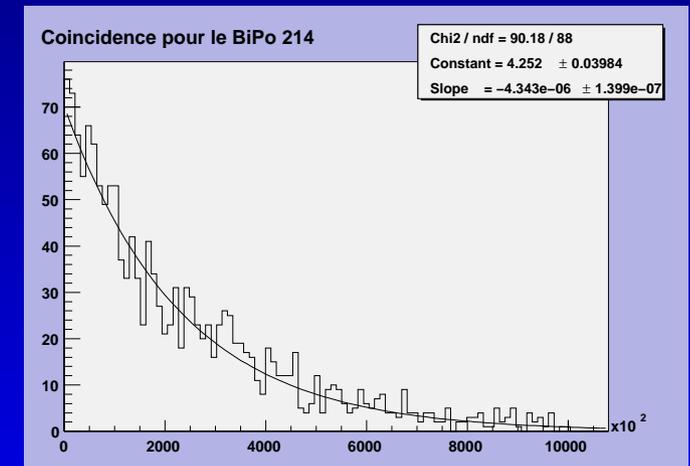
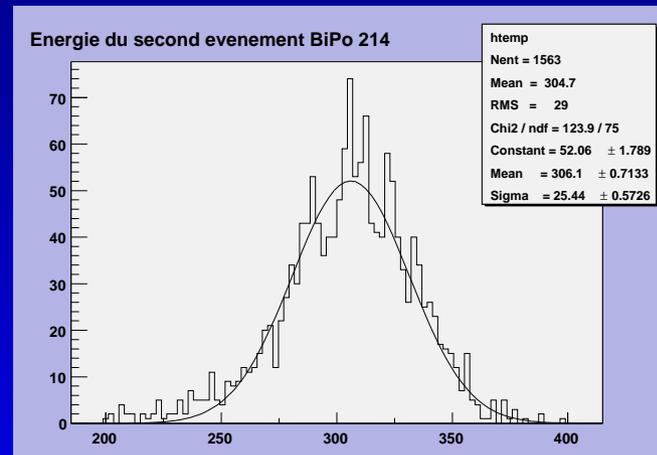
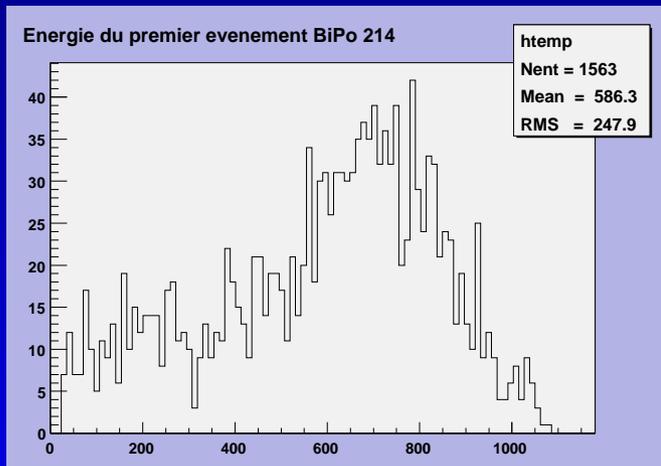
Sélection BiPo 214 (chaîne de l' $^{238}_{92}\text{U}$)

On retrouve

$$\tau_{84}^{214}\text{Po} = 230,2_{-7,2}^{+7,7} \mu\text{s} \quad (236,2 \pm 0,2 \mu\text{s} \text{ attendu})$$

Et on évalue la contamination :

$$C_{92}^{238}\text{U} = 1,27 \pm 0,03 \pm 0,06 \cdot 10^{-14} \text{ g/g} \quad (10^{-16} \text{ g/g nominal})$$



Énergie du β du $^{214}_{83}\text{Bi}$

Énergie de l' α du $^{214}_{84}\text{Po}$

Coïncidence

Mesure du BiPo 214 au début de CTF III

Mesure du BiPo 214 au début de CTF III

Objectif : évaluer les BiPo 214 au tout début du remplissage de CTF III, *run* 2047.

Temps de fonctionnement 6670 secondes.

Mesure du BiPo 214 au début de CTF III

Objectif : évaluer les BiPo 214 au tout début du remplissage de CTF III, *run 2047*.

Temps de fonctionnement 6670 secondes.

Notre sélection des événements :

- **coïncidence temporelle entre 5 μ s et 1 ms;**
- **énergie du second événement entre 200 et 400 p.e.**
- **pas de marquage muon**

Mesure du BiPo 214 au début de CTF III

Objectif : évaluer les BiPo 214 au tout début du remplissage de CTF III, *run 2047*.

Temps de fonctionnement 6670 secondes.

Notre sélection des événements :

- **coïncidence temporelle entre 5 μ s et 1 ms;**
- **énergie du second événement entre 200 et 400 p.e.**
- **pas de marquage muon**

Nous comptons alors 106 événements candidats,

***i.e.* correspondant à 3,86 mBq/m³.**

Mesure du BiPo 214 au début de CTF III

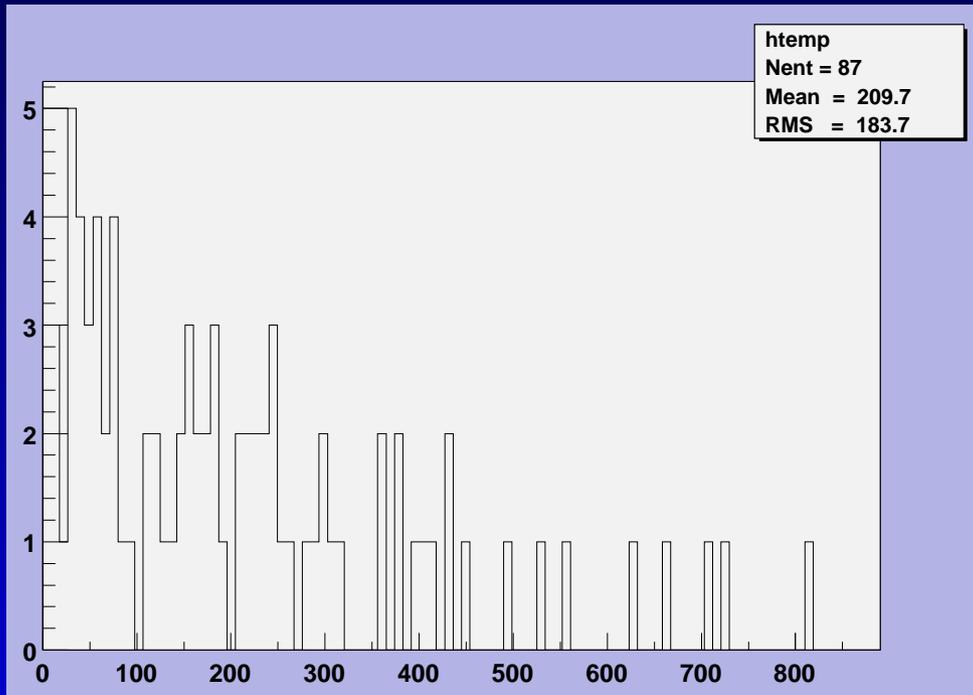
Mais il existe des coïncidences triples ou quadruples non vues par ElecM.

Avec le FADC, on extrait de nouvelles coïncidences candidates BiPo 214.

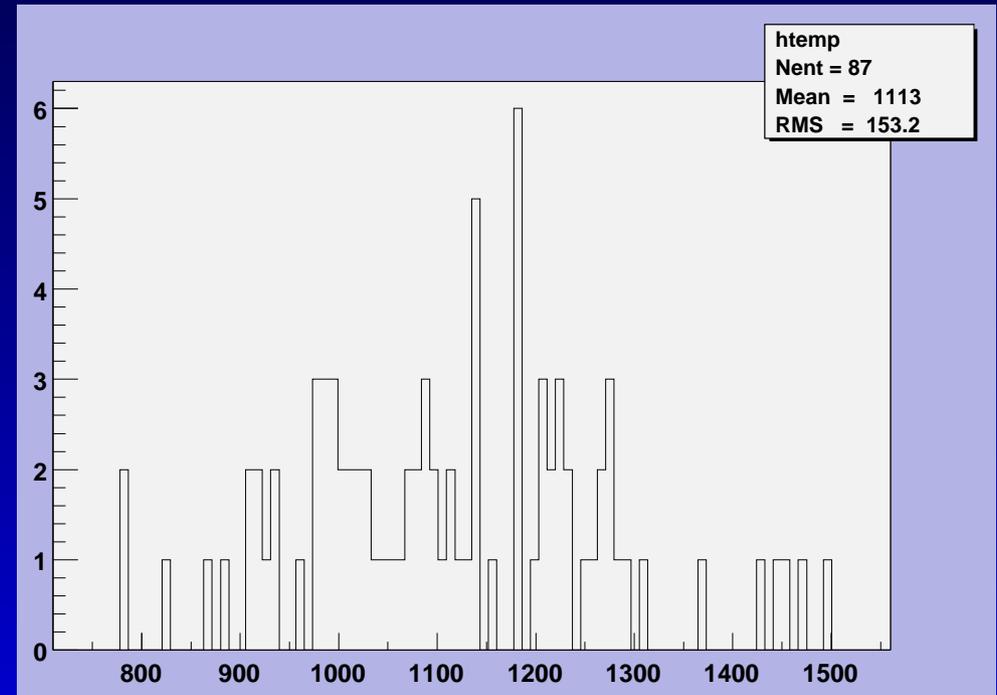
Mesure du BiPo 214 au début de CTF III

Mais il existe des coïncidences triples ou quadruples non vues par ElecM.

Avec le FADC, on extrait de nouvelles coïncidences candidates BiPo 214.



Distribution de coïncidence



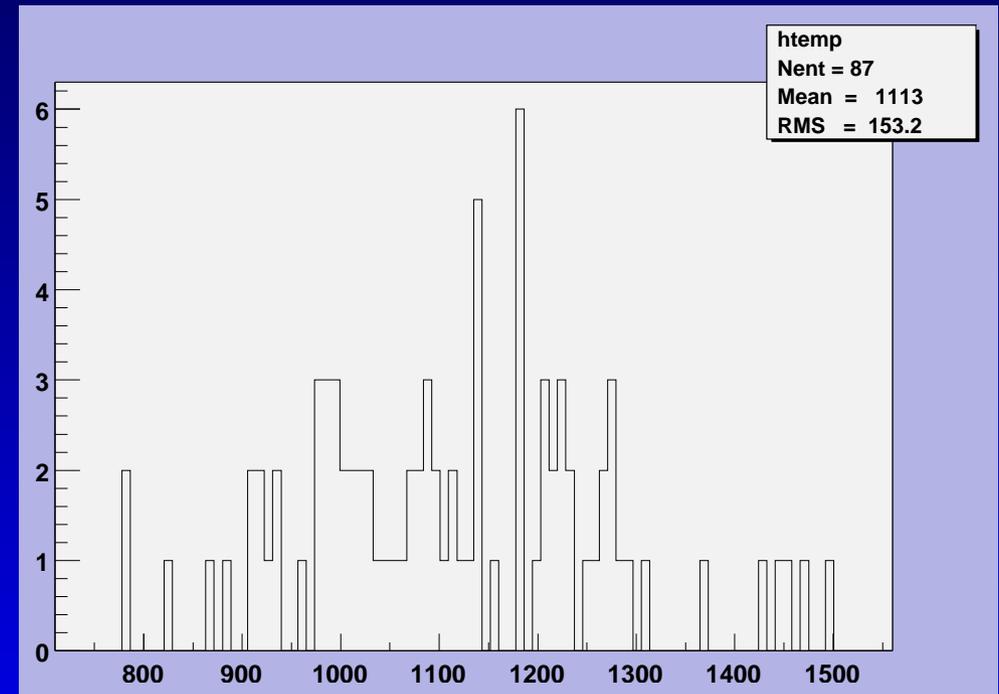
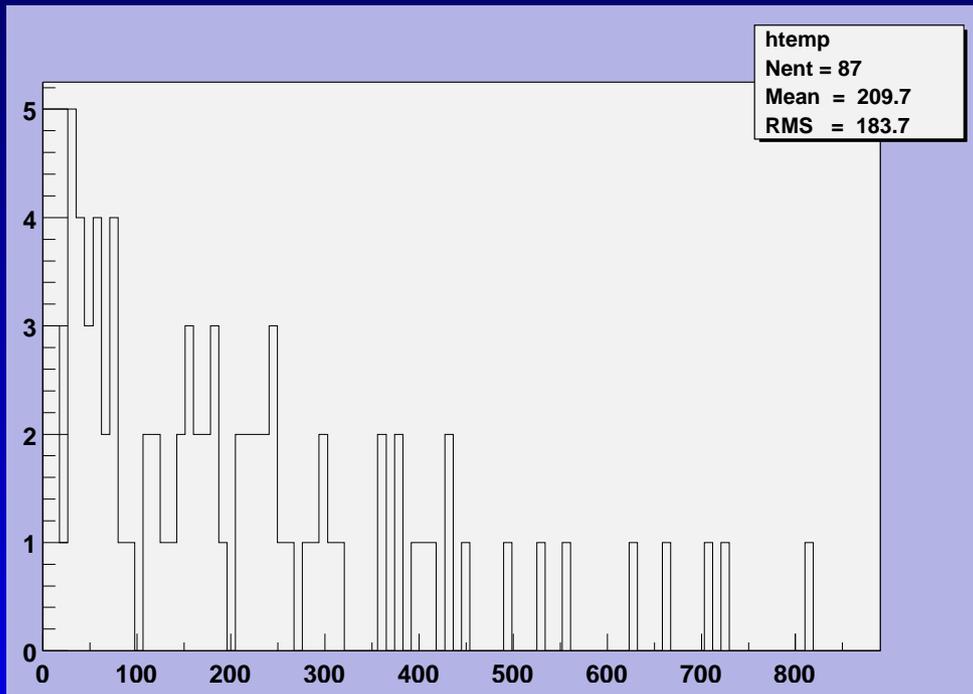
Distribution en énergie FADC de l' α

Mesure du BiPo 214 au début de CTF III

Nous devons alors ajouter 87 candidats aux 106 précédents.

Nous arrivons, pour ce premier *run* de CTF III, à

$$C_{92}^{238}\text{U} = 6,3 \cdot 10^{-13} \text{ g/g} \quad (10^{-16} \text{ g/g nominal})$$



Distribution de coïncidence

Distribution en énergie FADC de l' α

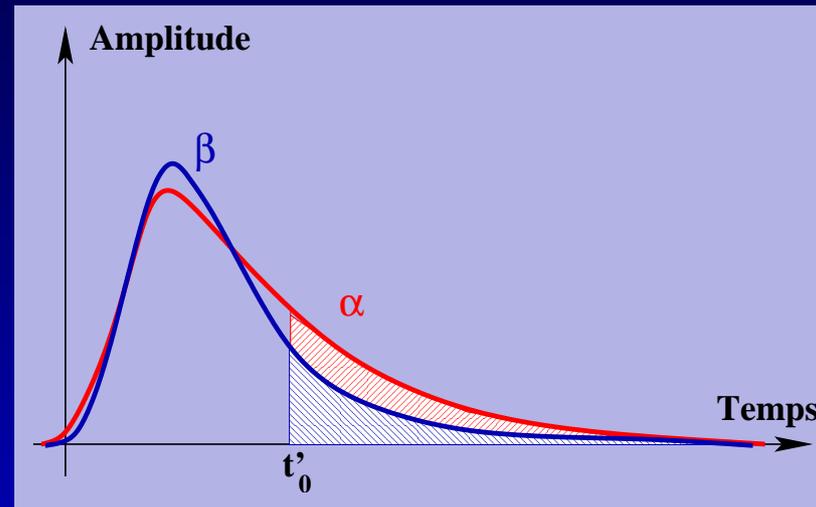
Résultats sur le CTF

Discrimination α/β

Principe de discrimination

Nous utilisons ici comme variable discriminante le rapport charge arrière sur charge totale du signal :

$$\theta = \frac{\int_{t'_0}^{t_{\text{int}}} q(t) dt}{\int_0^{t_{\text{int}}} q(t) dt}$$



À partir de θ , nous introduisons le facteur de mérite :

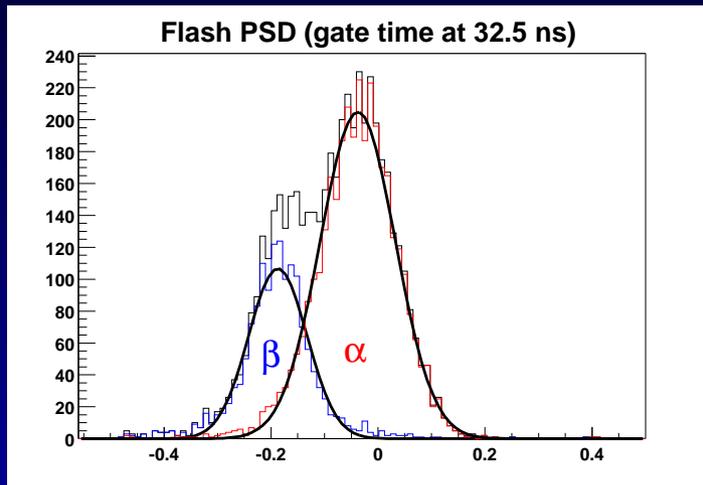
$$M = \frac{\text{Moy}(\theta_\alpha) - \text{Moy}(\theta_\beta)}{\sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2}}$$

Discrimination

Discrimination

FADC PSD, 32,5 ns

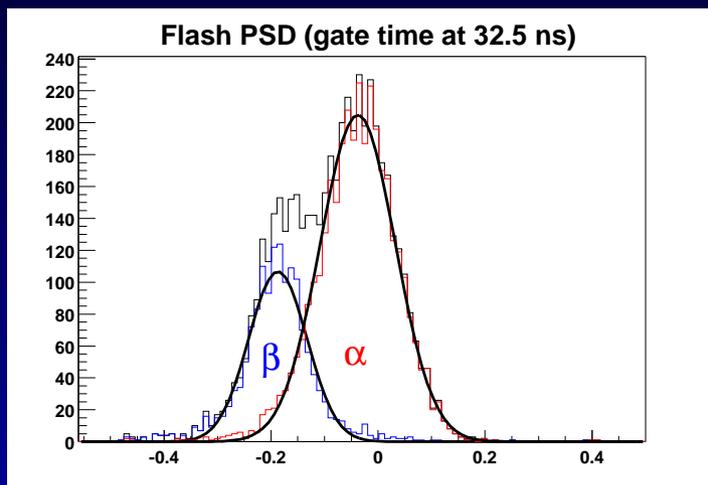
$M = 1,68$



Discrimination

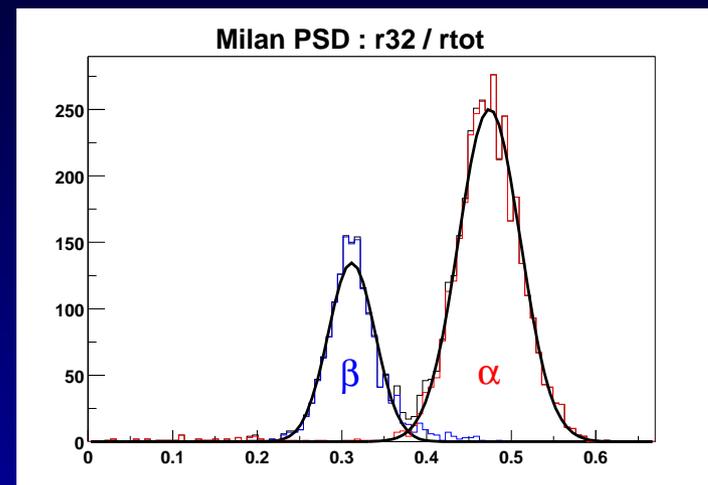
FADC PSD, 32,5 ns

$M = 1,68$



Milan PSD, 32 ns

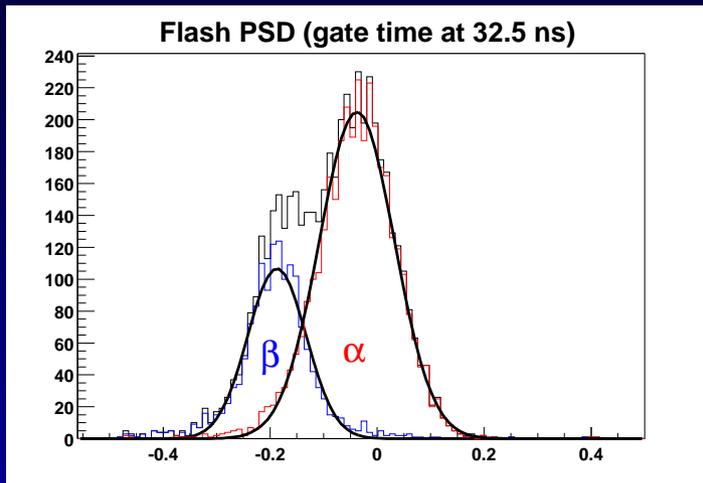
$M = 3,54$



Discrimination

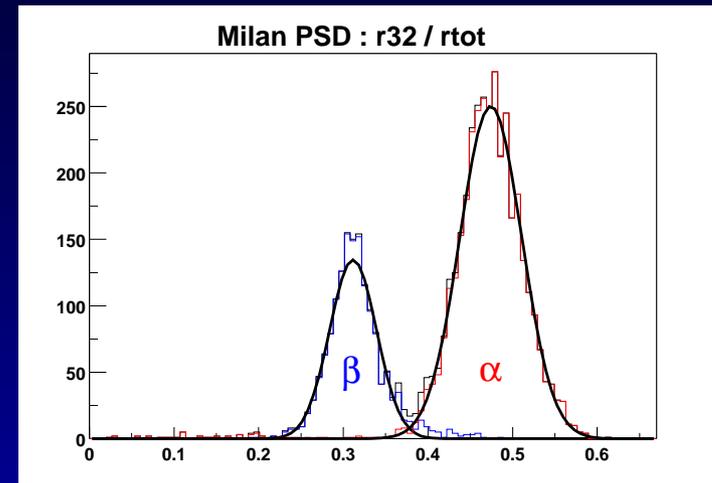
FADC PSD, 32,5 ns

$M = 1,68$



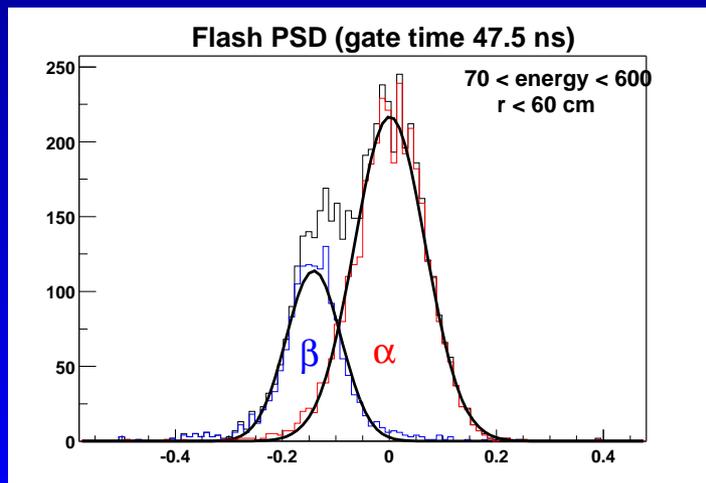
Milan PSD, 32 ns

$M = 3,54$



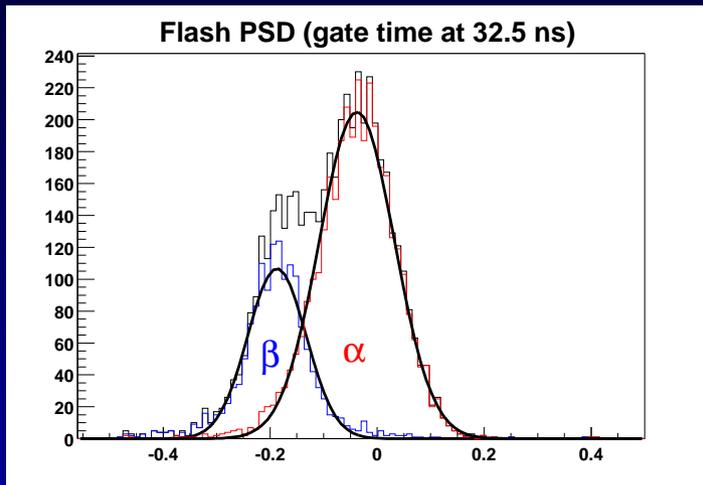
FADC PSD, 47,5 ns

$M = 1,70$

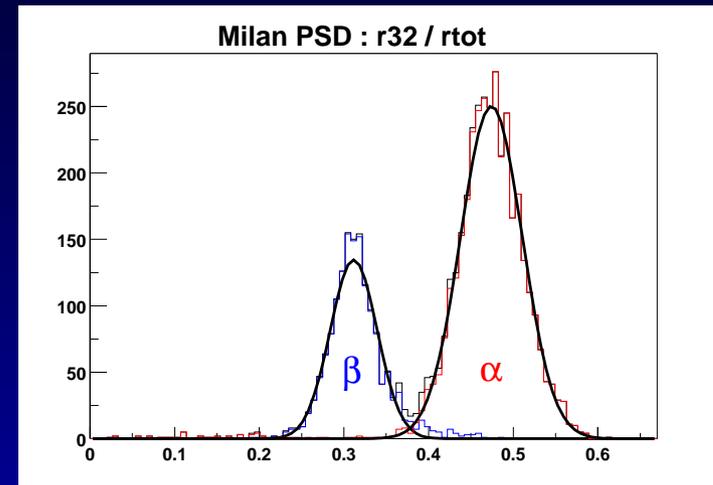


Discrimination

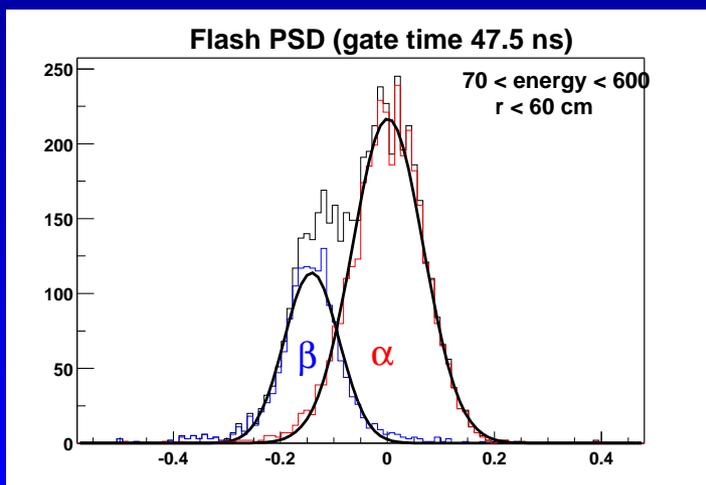
FADC PSD, 32,5 ns



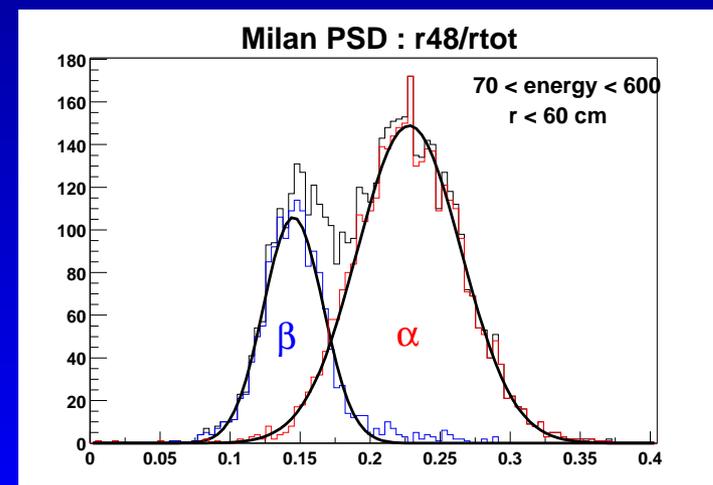
Milan PSD, 32 ns



FADC PSD, 47,5 ns



Milan PSD, 48 ns



$M = 1,68$

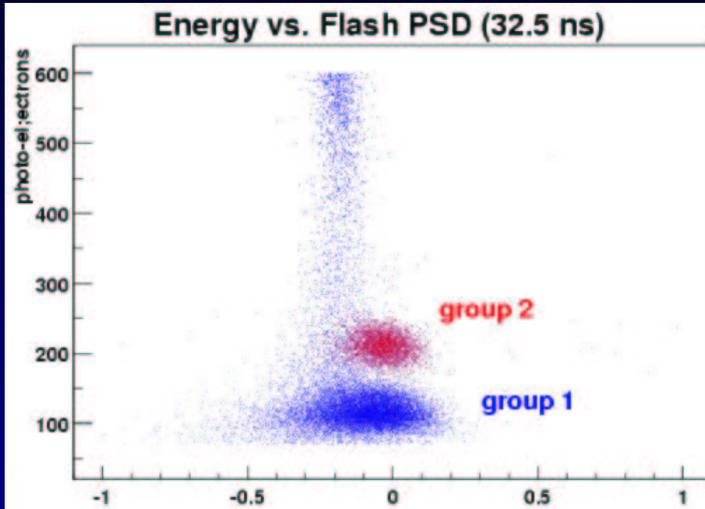
$M = 3,54$

$M = 1,70$

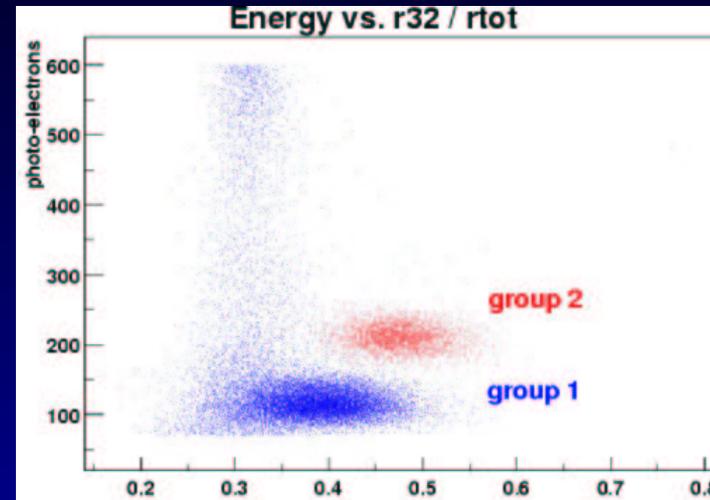
$M = 1,93$

Discrimination

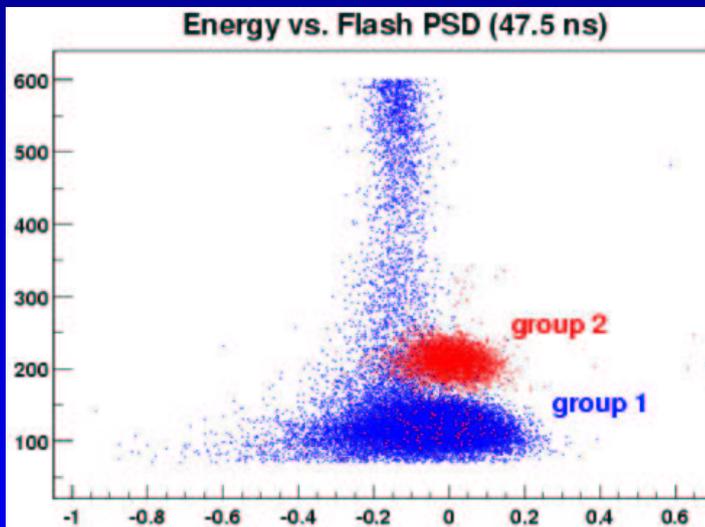
FADC PSD, 32,5 ns



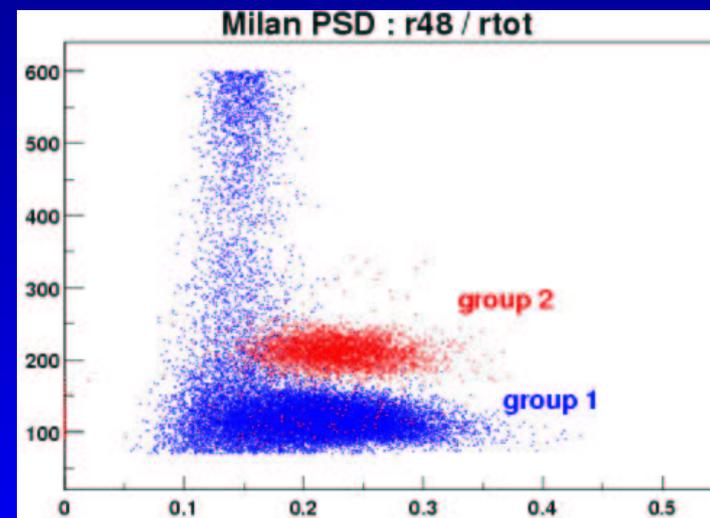
Milan PSD, 32 ns



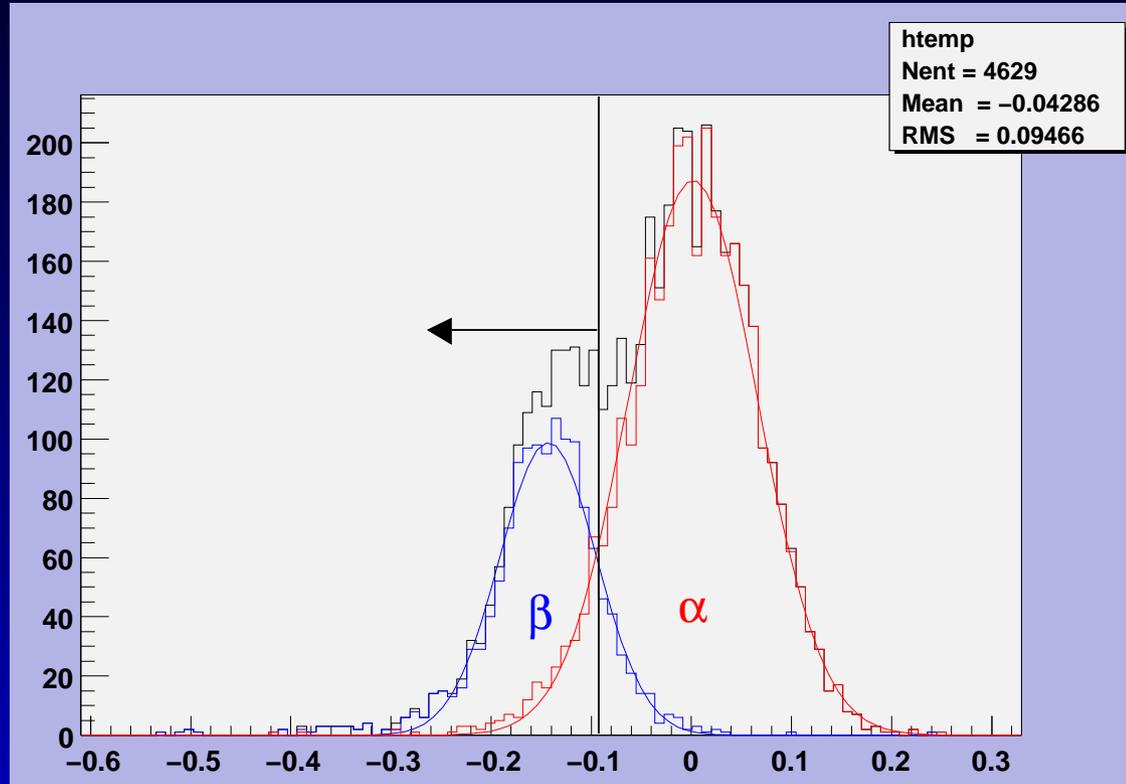
FADC PSD, 47,5 ns



Milan PSD, 48 ns



Résultat discrimination à base FADC



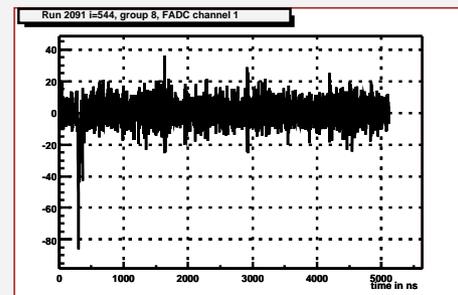
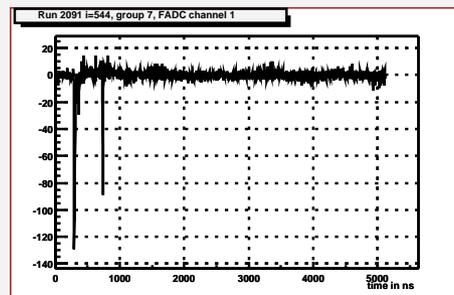
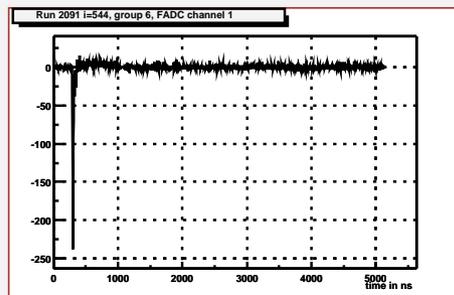
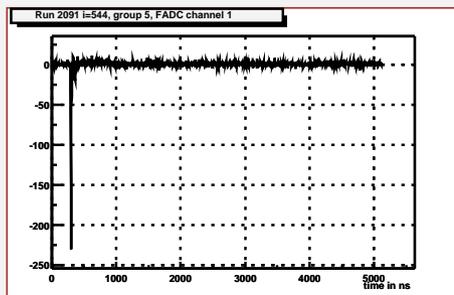
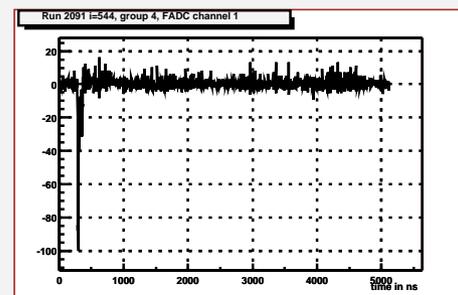
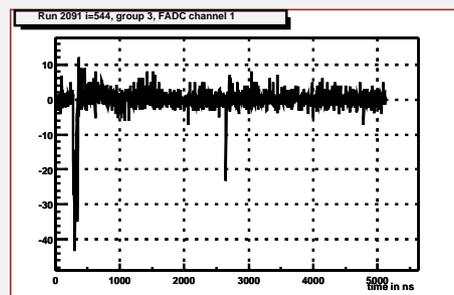
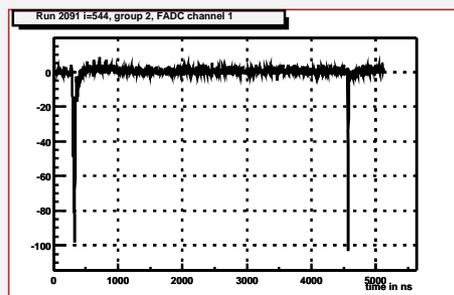
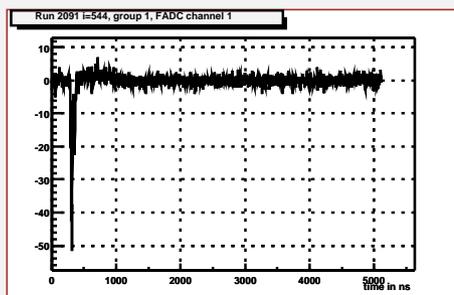
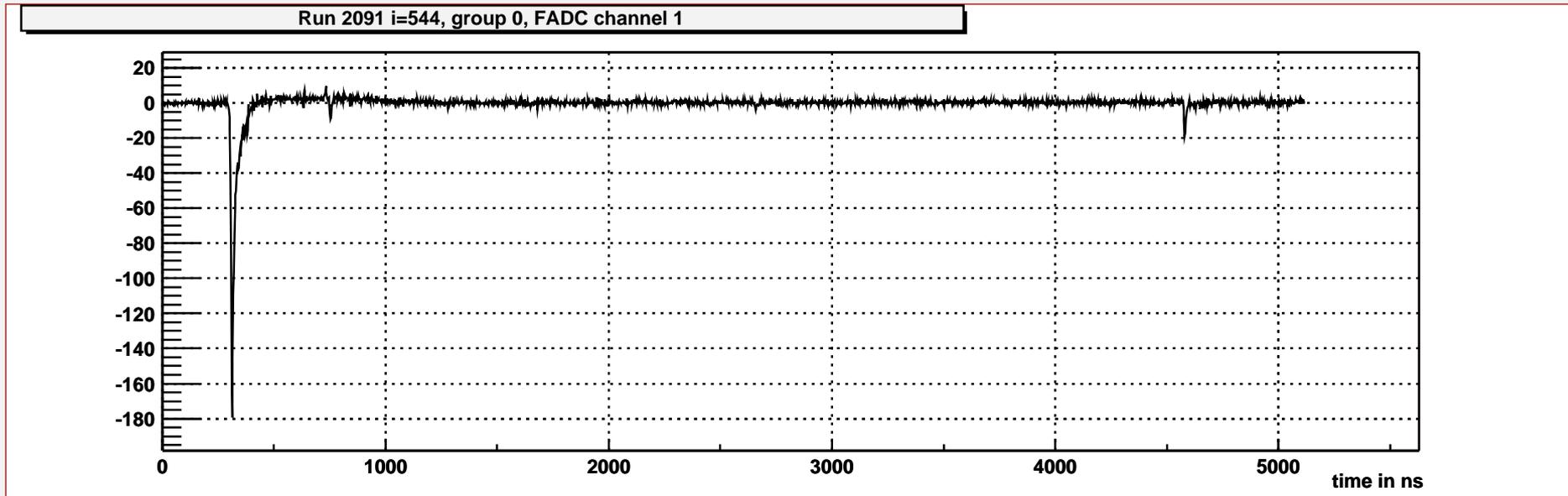
Avec cette coupure, nous obtenons :

- **une contamination de 10% de α parmi les β**
- **une efficacité de détection de 86% des β .**

Résultats sur le CTF

Analyse post-impulsion dans CTF

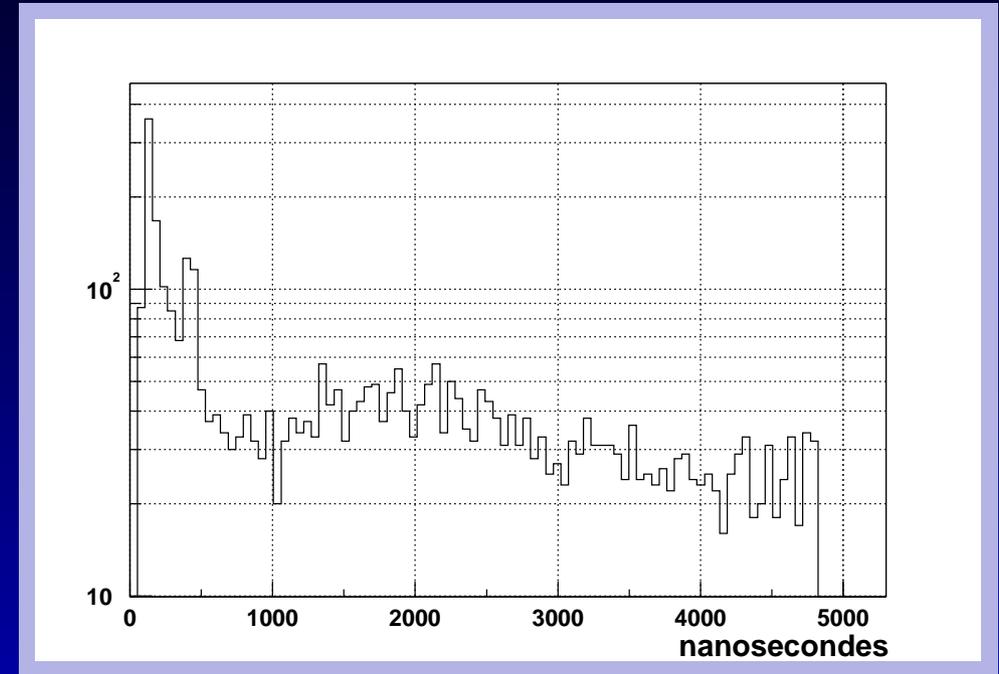
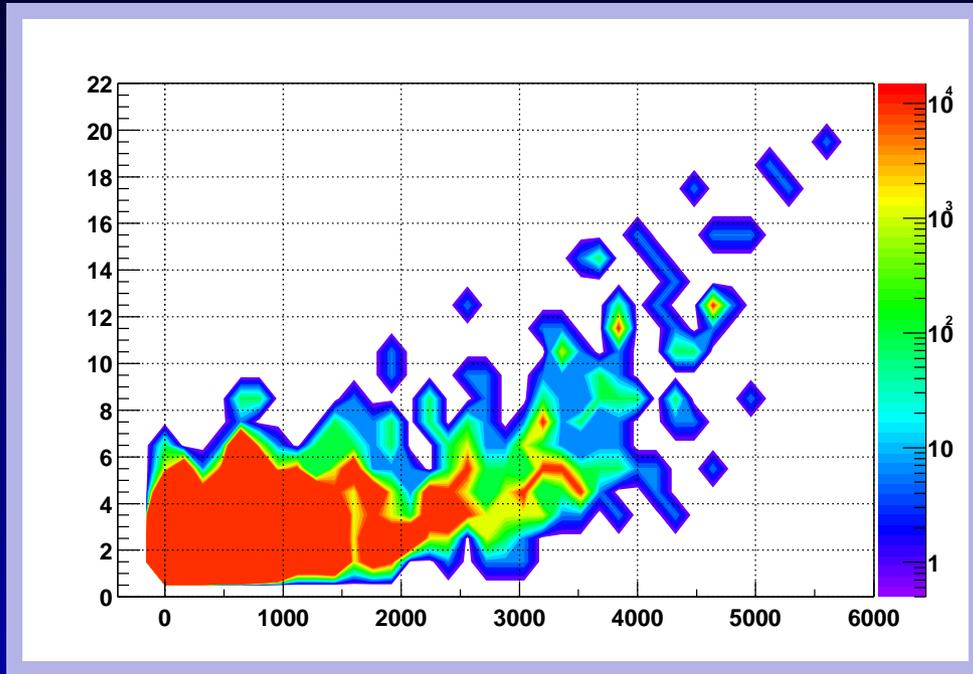
Analyse des post-impulsions



Analyse des post-impulsions

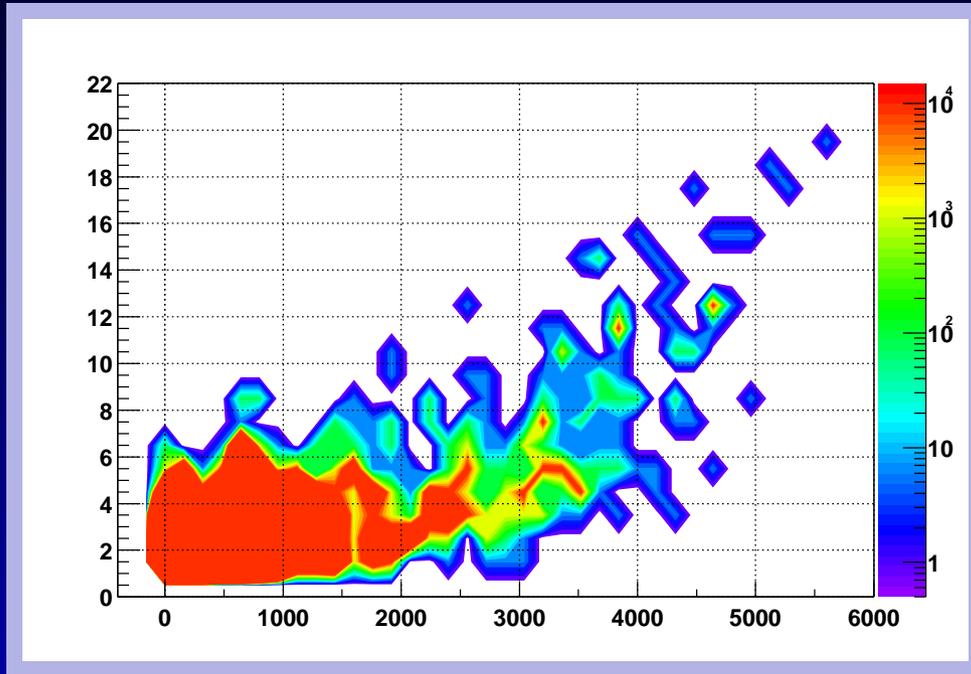
Nombre de posts-impulsions vs. énergie

Distribution temporelle des pics

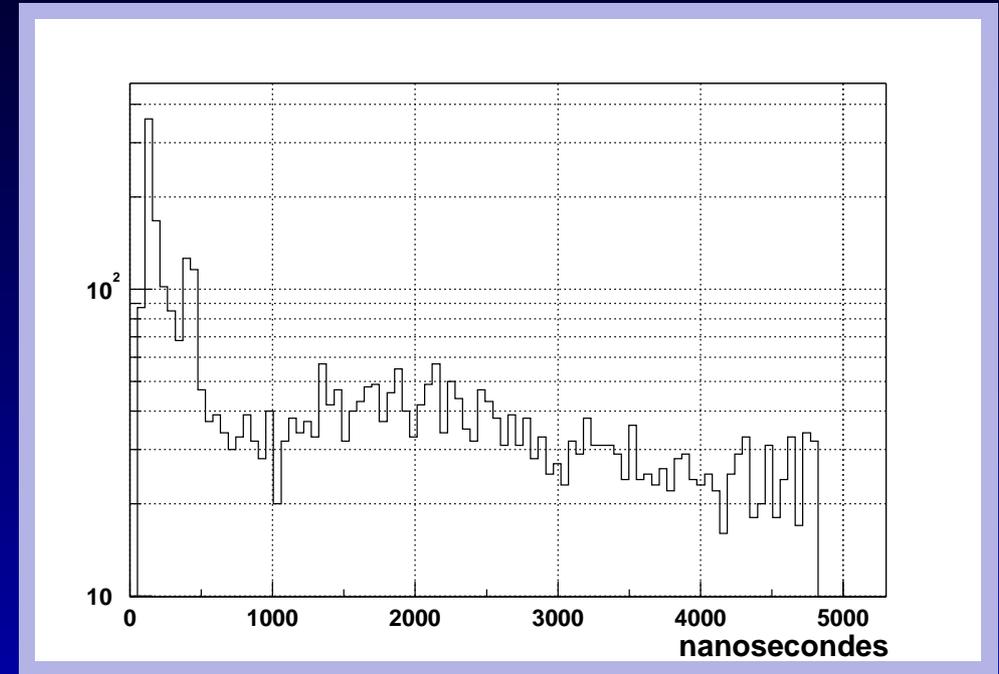


Analyse des post-impulsions

Nombre de posts-impulsions vs. énergie



Distribution temporelle des pics



➡ En accord avec les taux attendus d'impulsions dues à des ions créés par les photo-électrons primaires

Calendrier à court terme de Borexino

- **Installation complète des systèmes liés au FADC, avant fin 2002;**

Calendrier à court terme de Borexino

- **Installation complète des systèmes liés au FADC, avant fin 2002;**
- **Installation des voiles en nylon, fin novembre 2002;**

Calendrier à court terme de Borexino

- **Installation complète des systèmes liés au FADC, avant fin 2002;**
- **Installation des voiles en nylon, fin novembre 2002;**
- **Début remplissage en eau, février 2003;**

Calendrier à court terme de Borexino

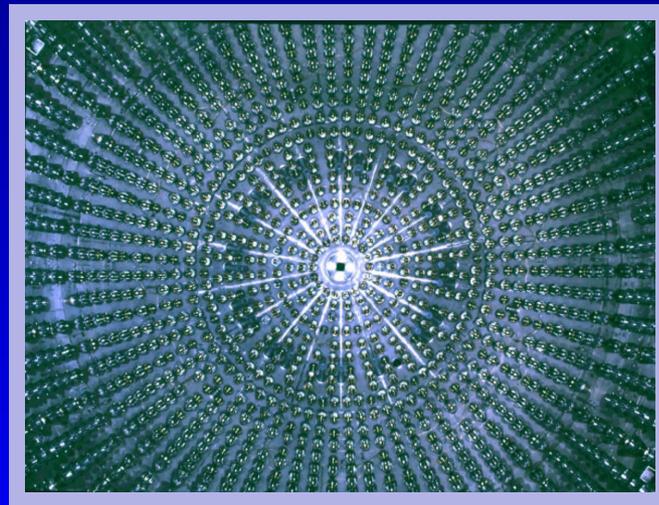
- **Installation complète des systèmes liés au FADC, avant fin 2002;**
- **Installation des voiles en nylon, fin novembre 2002;**
- **Début remplissage en eau, février 2003;**
- **Premier *run* Čerenkov, mars 2003;**

Calendrier à court terme de Borexino

- **Installation complète des systèmes liés au FADC, avant fin 2002;**
- **Installation des voiles en nylon, fin novembre 2002;**
- **Début remplissage en eau, février 2003;**
- **Premier *run* Čerenkov, mars 2003;**
- **Premières tonnes de PC, mi 2003;**

Calendrier à court terme de Borexino

- **Installation complète des systèmes liés au FADC, avant fin 2002;**
- **Installation des voiles en nylon, fin novembre 2002;**
- **Début remplissage en eau, février 2003;**
- **Premier *run* Čerenkov, mars 2003;**
- **Premières tonnes de PC, mi 2003;**
- **Fin des activités de remplissage, avant fin 2003.**



Conclusions



Conclusions

CTF est un banc d'essai pour

- les problèmes liés à la radiopureté (niveau, mesure)
- nos FADC (électronique, acquisition)

Conclusions

CTF est un banc d'essai pour

- les problèmes liés à la radiopureté (niveau, mesure)
- nos FADC (électronique, acquisition)

En particulier, nous avons montré :

- ✓ le bon fonctionnement des FADC et leur intérêt dans les mesures (pas de temps mort, discrimination, analyse des impulsions secondaires)
- ✓ la performance du logiciel d'acquisition
- ✓ la possibilité de la gestion de grand volume de données

Conclusions

CTF est un banc d'essai pour

- les problèmes liés à la radiopureté (niveau, mesure)
- nos FADC (électronique, acquisition)

En particulier, nous avons montré :

- ✓ le bon fonctionnement des FADC et leur intérêt dans les mesures (pas de temps mort, discrimination, analyse des impulsions secondaires)
- ✓ la performance du logiciel d'acquisition
- ✓ la possibilité de la gestion de grand volume de données

Cette expertise est actuellement transférée à Borexino.

Conclusions



Implantation de 34 cartes FADC dans l'électronique Borexino

Conclusions

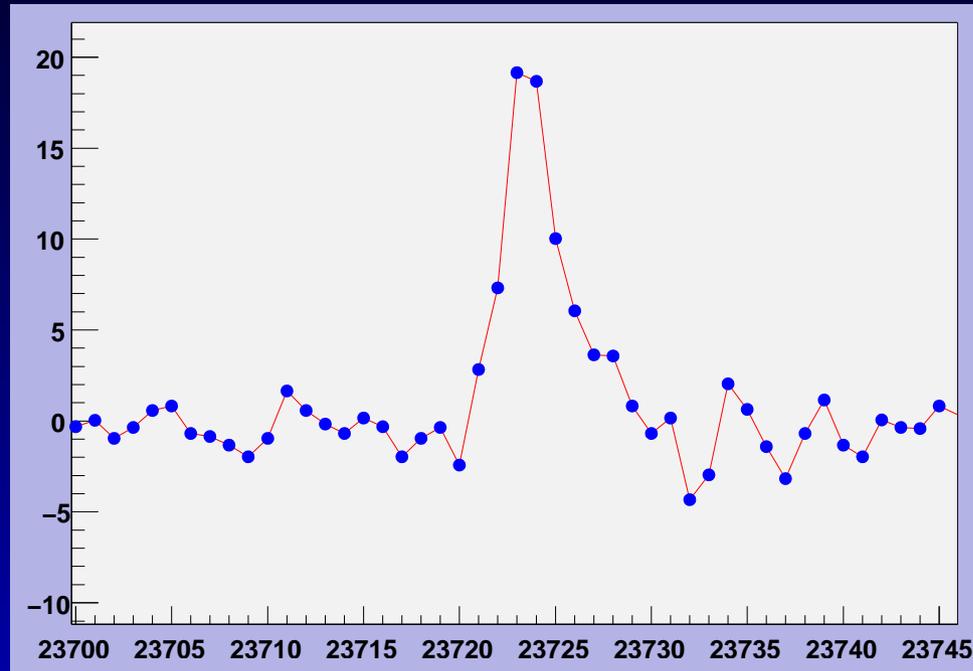
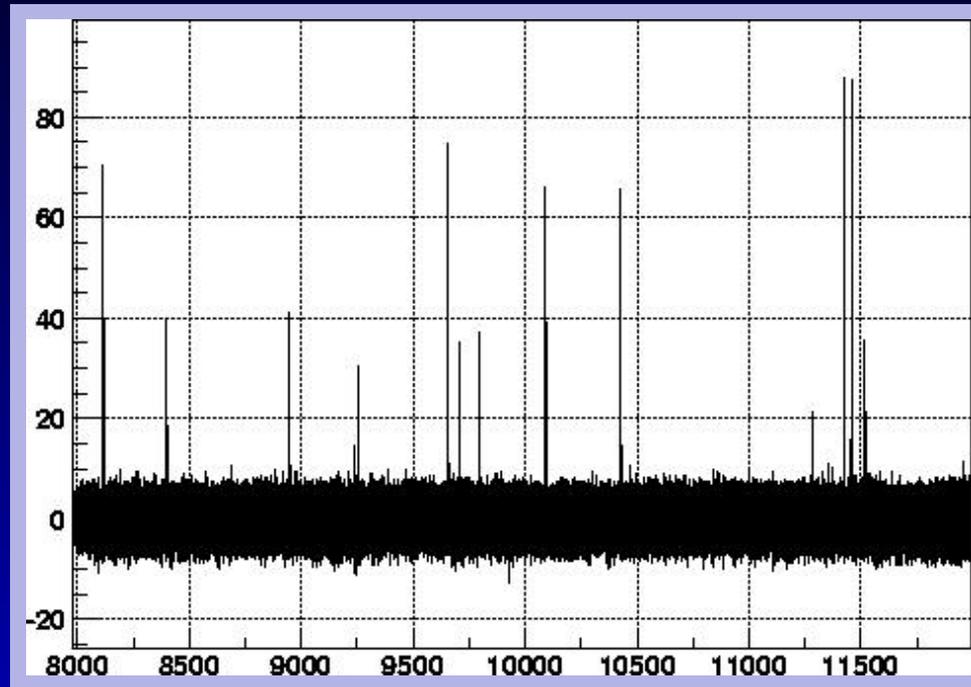


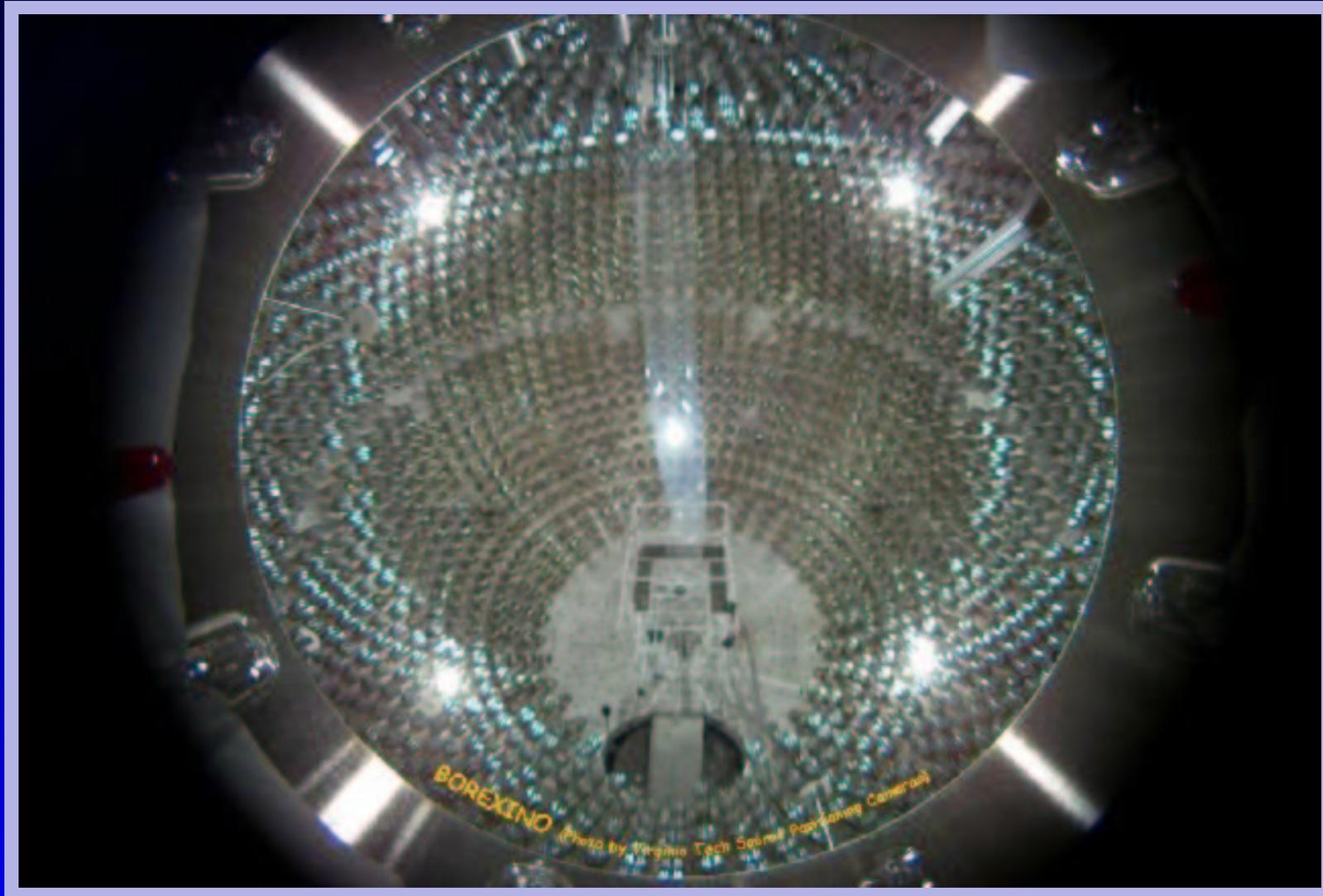
Photo-électron unique enregistré par le FADC sur Borexino (*air run*)

Conclusions

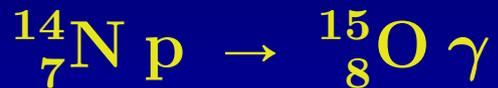


Premiers tests de bruit des PM sur Borexino (*air run*)

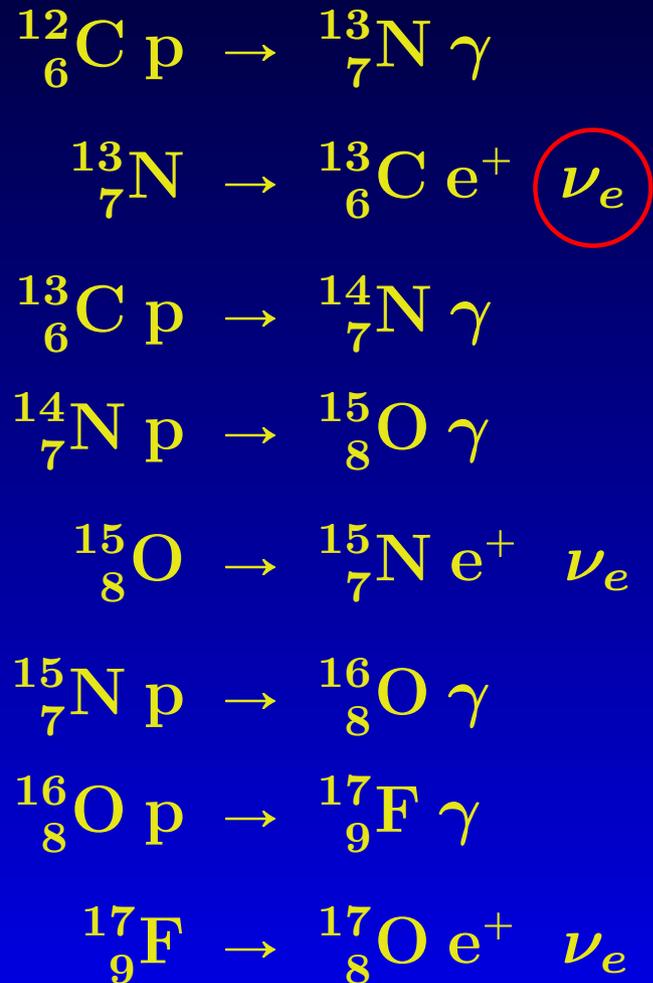
Conclusions



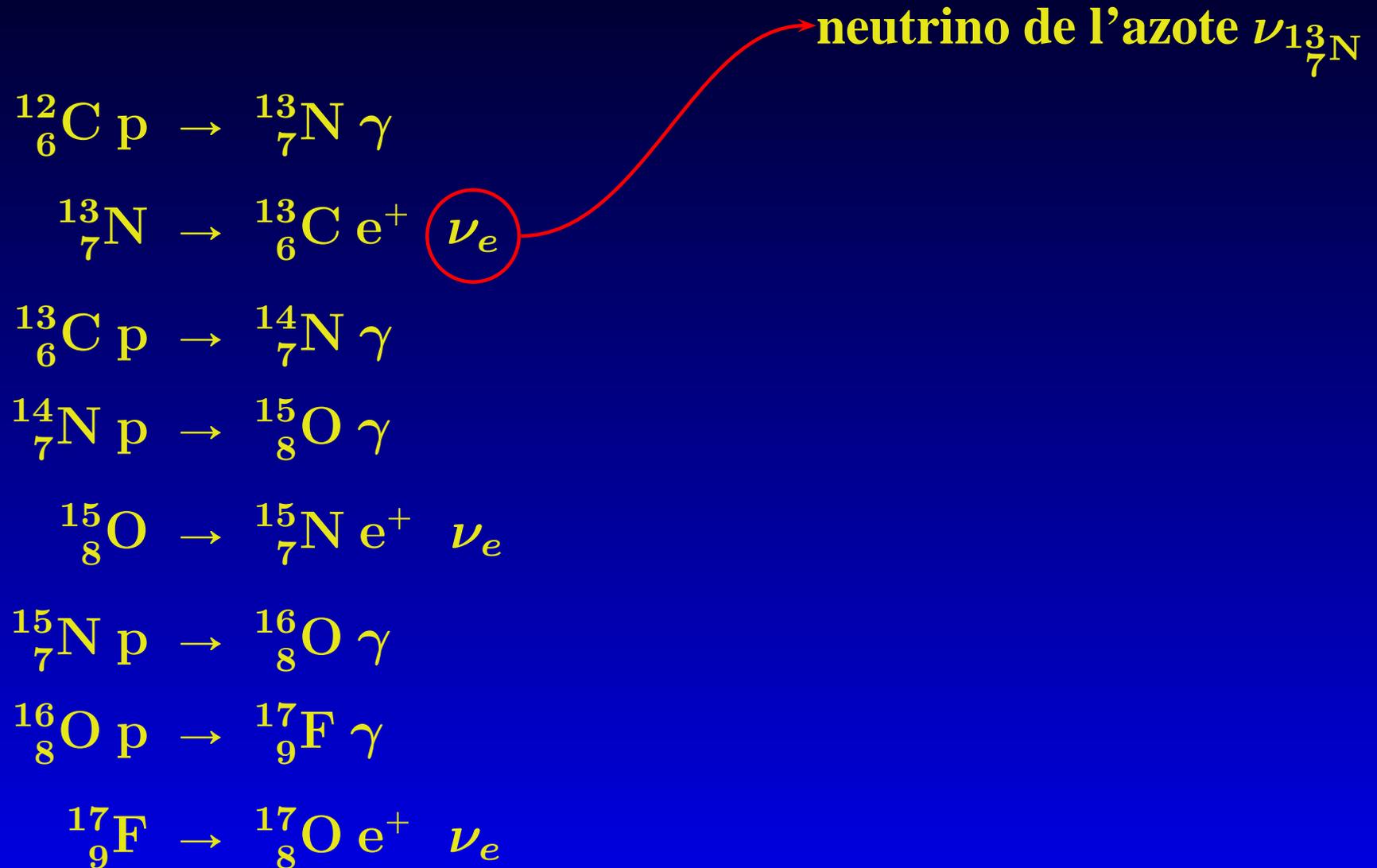
Neutrinos solaires : cycle CNO



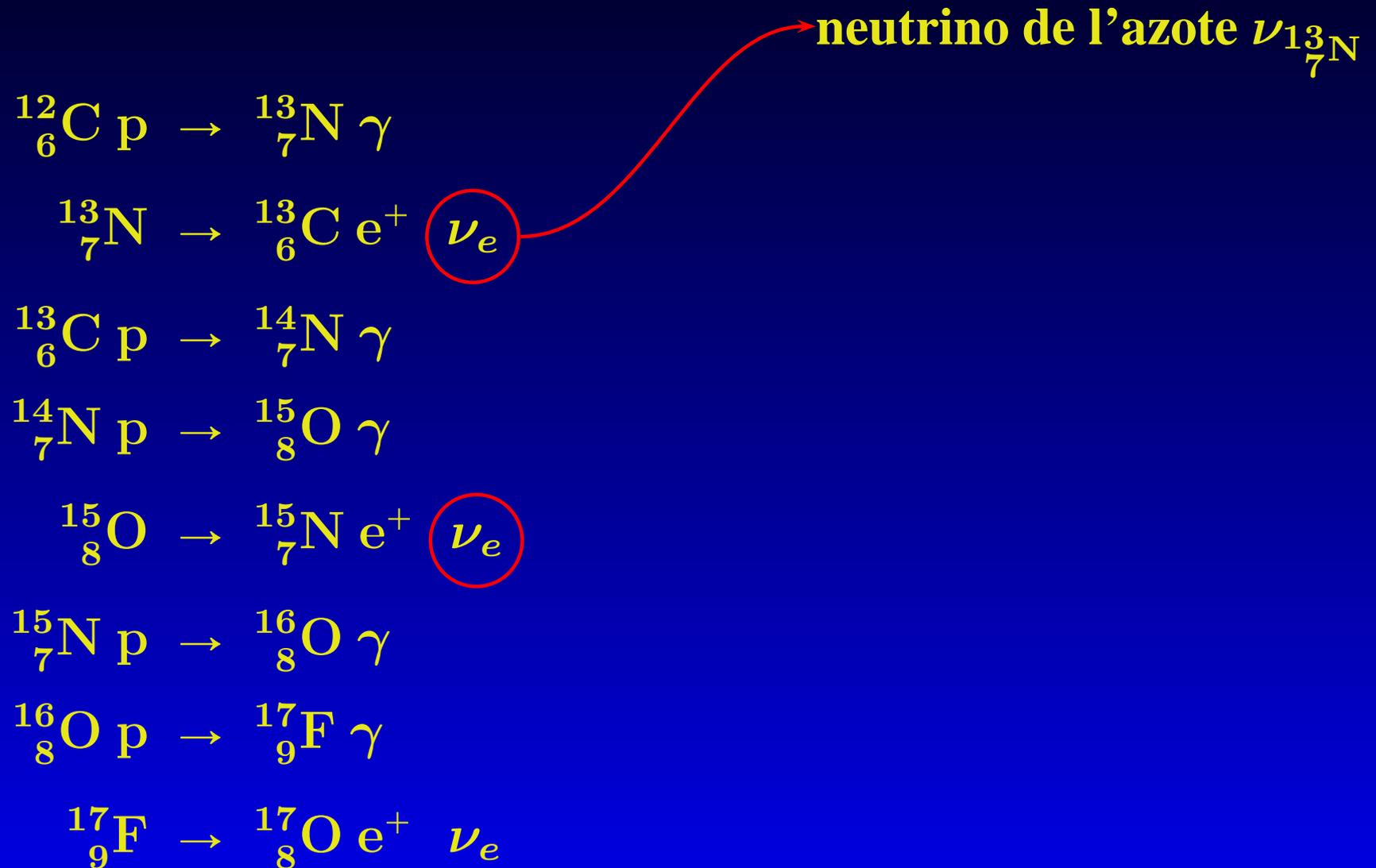
Neutrinos solaires : cycle CNO



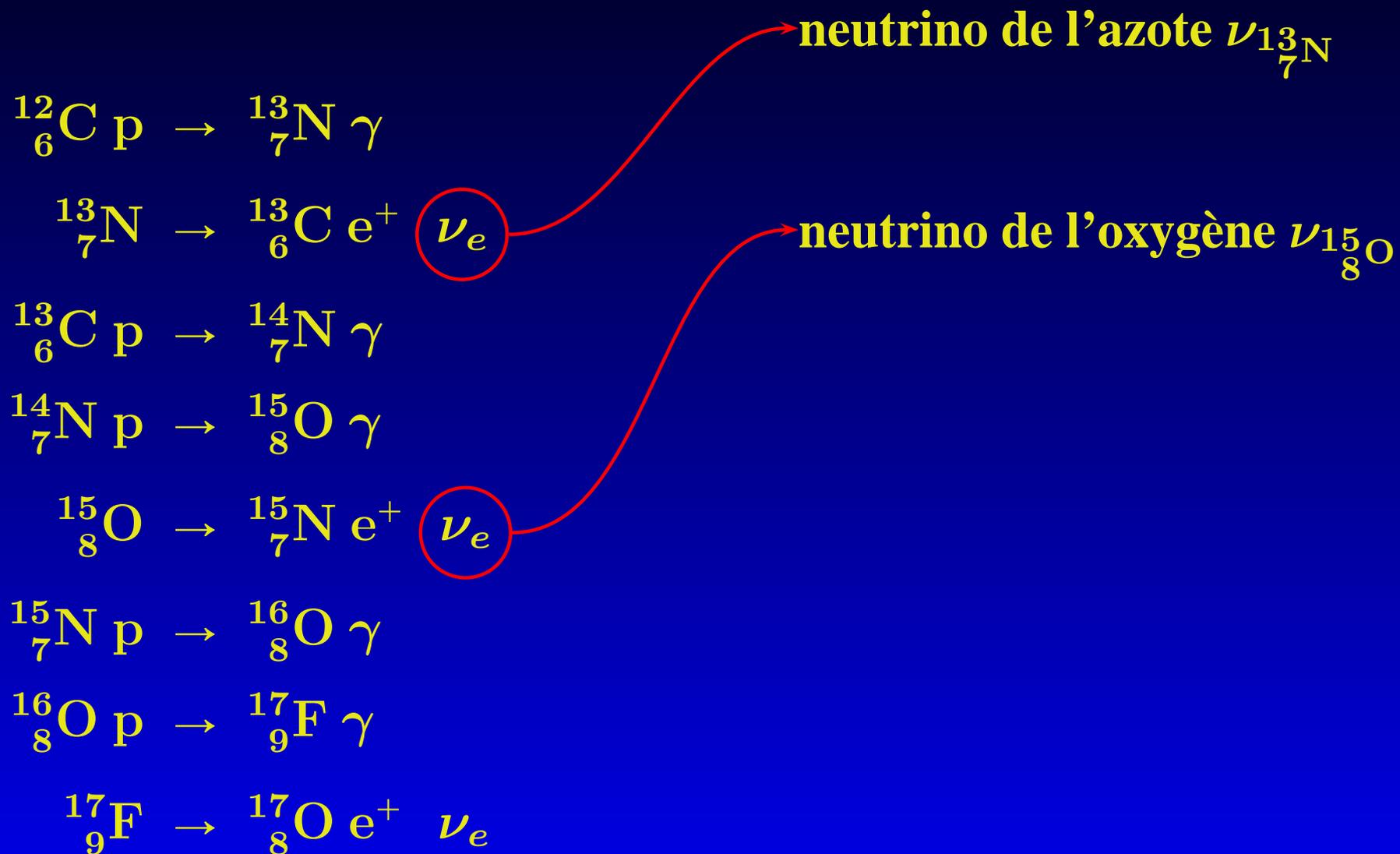
Neutrinos solaires : cycle CNO



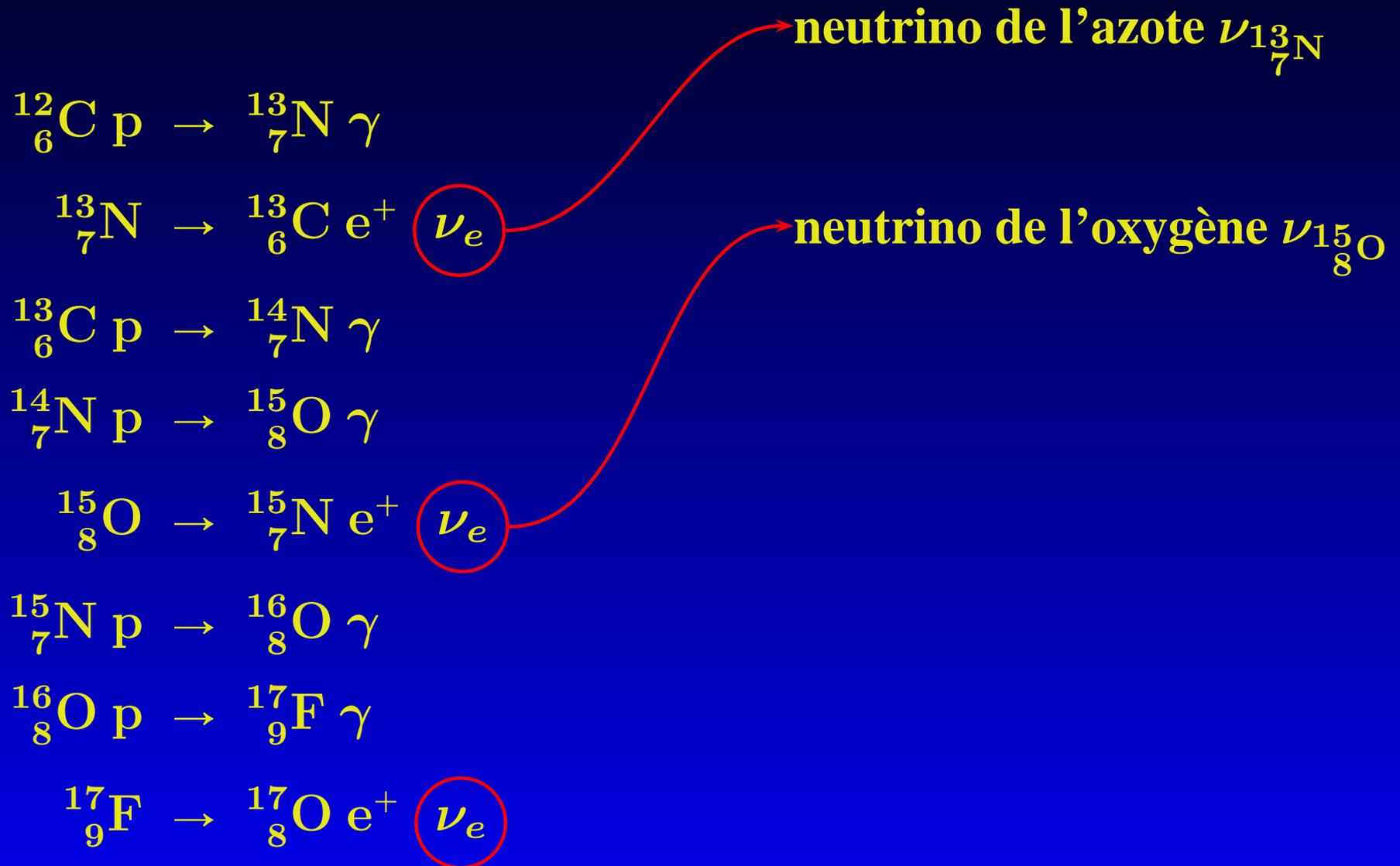
Neutrinos solaires : cycle CNO



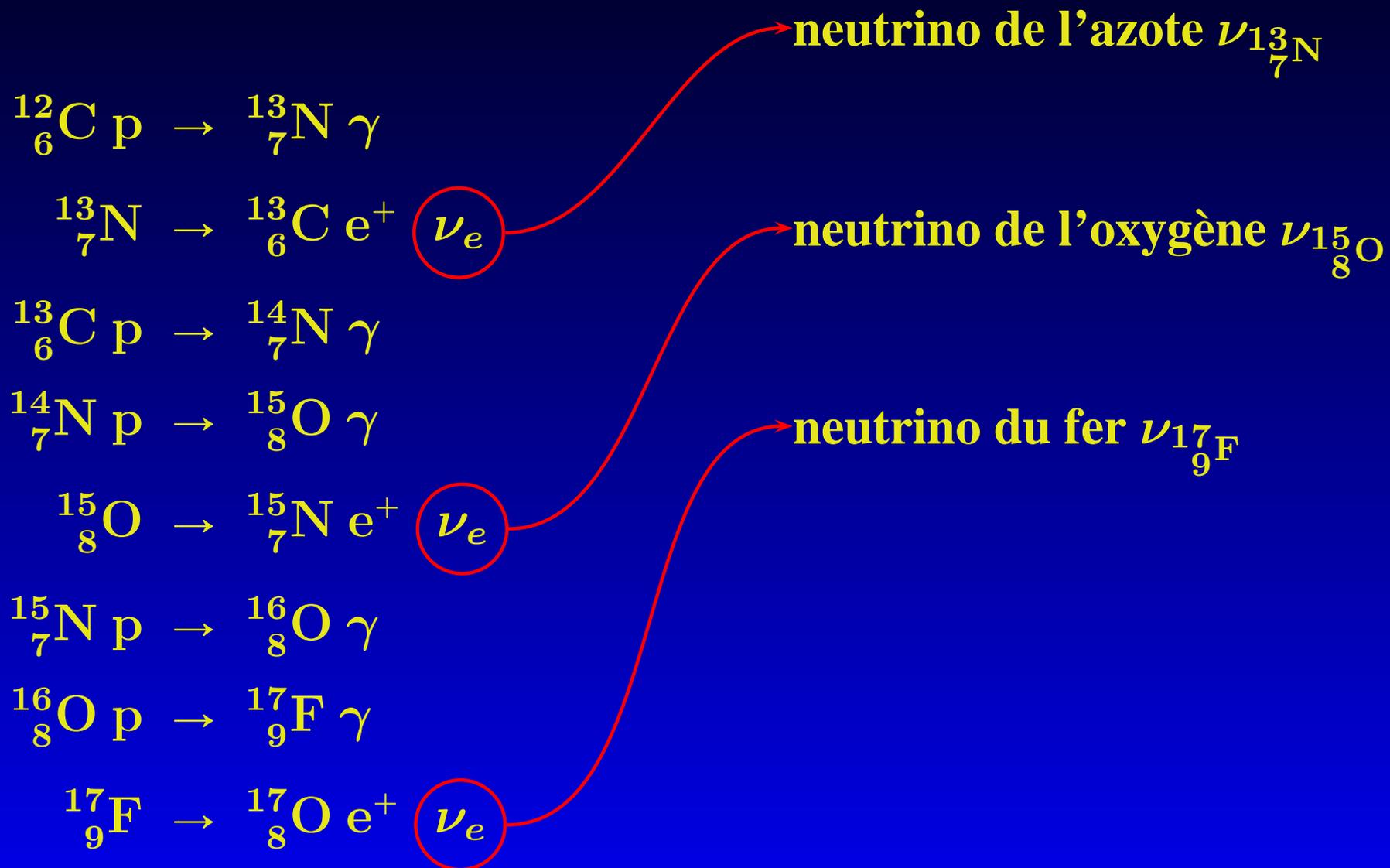
Neutrinos solaires : cycle CNO



Neutrinos solaires : cycle CNO



Neutrinos solaires : cycle CNO



Neutrinos solaires : chaîne PP-I



Neutrinos solaires : chaîne PP-I

