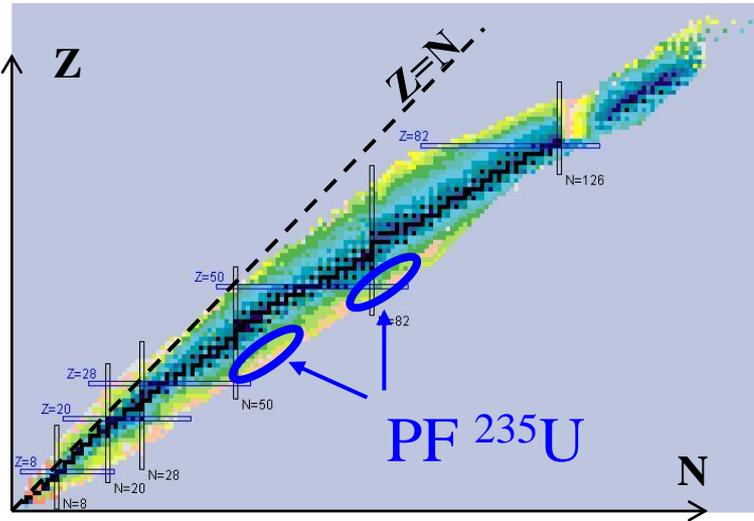
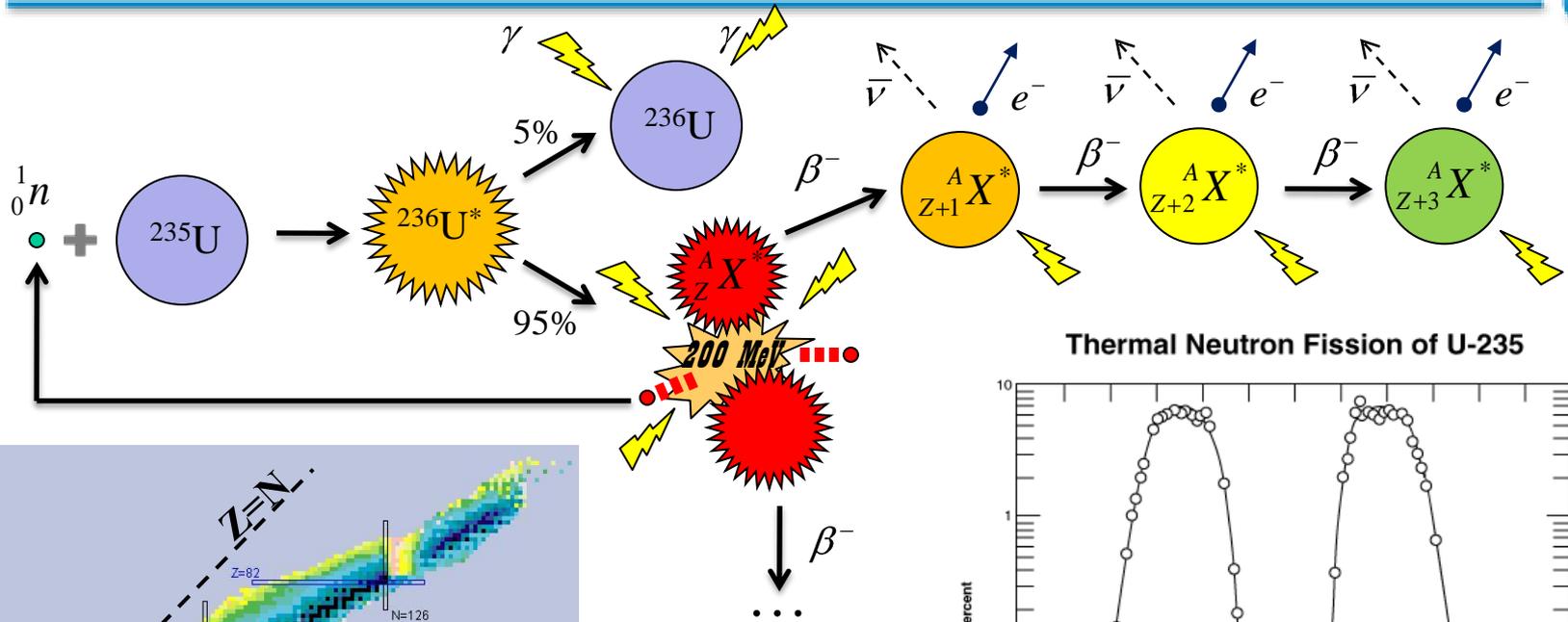

NUCIFER

Un détecteur miniature d'antineutrinos de réacteur

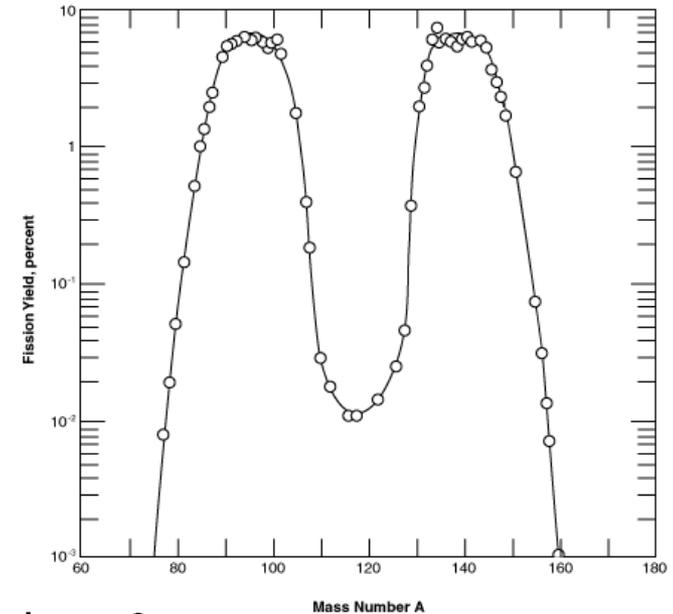


JRJC 2009
Jonathan Gaffiot
CEA – Irfu / SPhN

Le réacteur nucléaire, source d'antineutrino



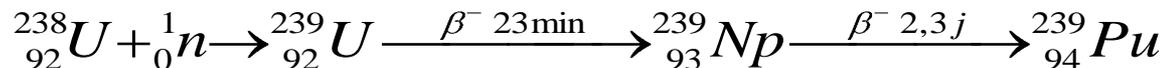
Thermal Neutron Fission of U-235



- Chaque fission donne lieu à 5,98 désintégrations β^-
- L'essentiel des décroissances est inférieur à quelques heures.
- Proportionnalité avec la puissance : $1 \text{ GW}_{th} \Leftrightarrow 2.10^{20} \bar{\nu} / s$

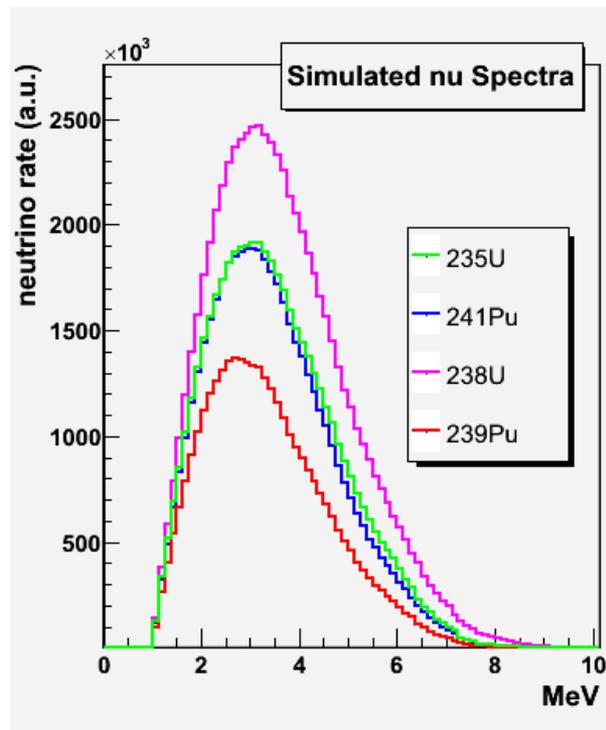
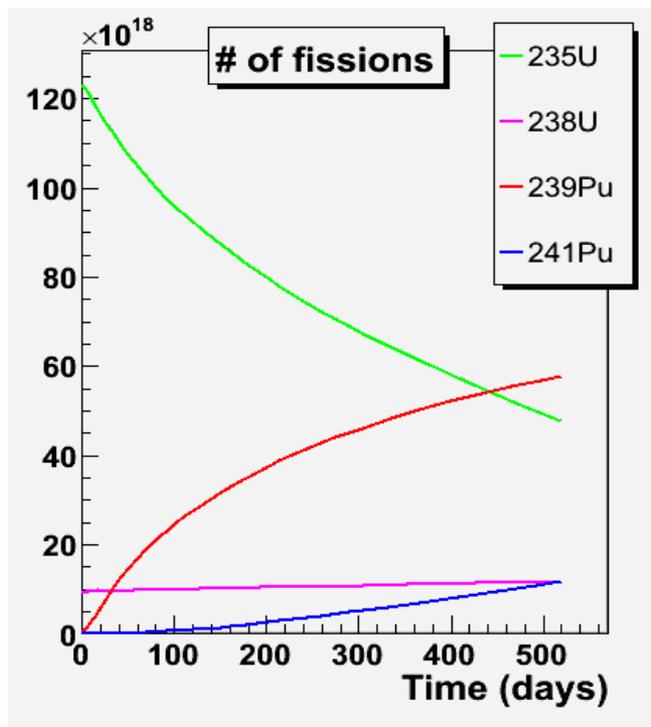
Evolution dans le temps

- La composition du combustible évolue avec le temps : apparition de Pu



- Le spectre antineutrino du Pu est différent de celui de l'U

~3,5% ${}^{235}\text{U}$ à t_0
(cœur neuf)
 $P_{th} = \text{cst} = 3 \text{ GW}$



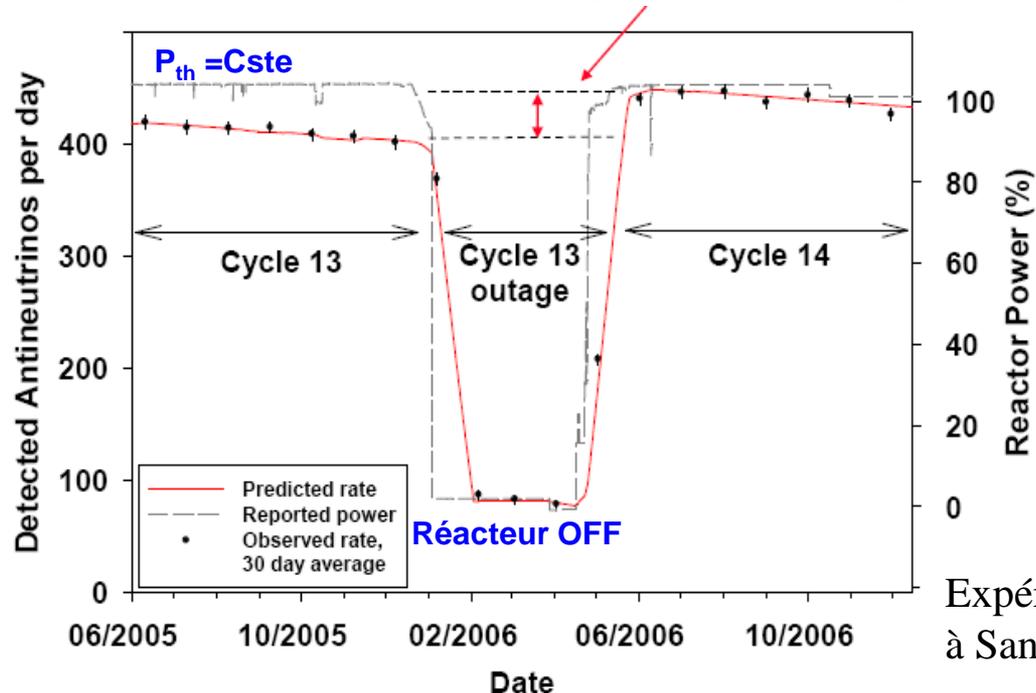
Simulation d'un cœur ne contenant que l'isotope indiqué

$$\frac{\int N_{239\text{Pu}}}{\int N_{235\text{U}}} = 0,6$$

- Au final, taux de comptage de la forme : $N_{\bar{\nu}} = \gamma(1 + k(t)) P_{th}$
 – γ constante physique et de détection, $k \propto$ temps équivalent pleine puissance

Cahier des charges

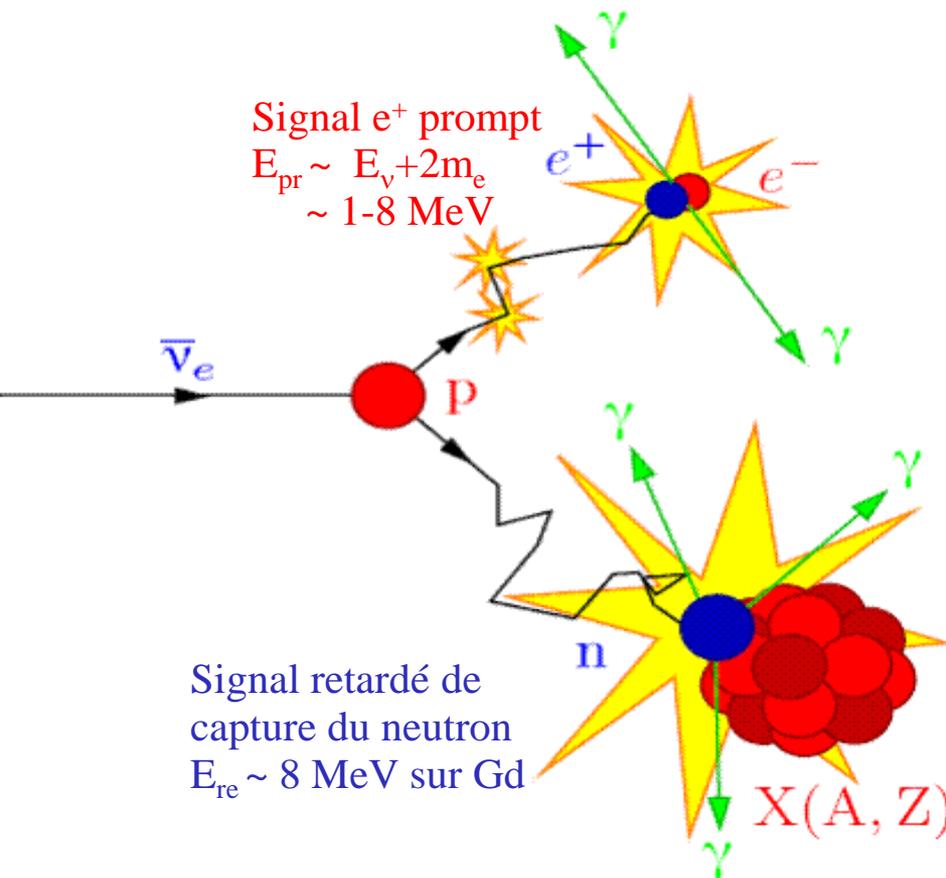
- Détecteur "miniature" en prospection pour l'AIEA
 - Cube de 3 m de côté, quelques dizaines de tonnes
 - Fiable et sans risque supplémentaire pour la centrale
 - Opérable à distance avec des contrôles éloignés dans le temps
 - Méthode non intrusive, signal non perturbable et non écrantable
- Suivi de la puissance en "temps réel" : $\sim 10^4$ evts/j (1% d'erreur statistique)
- Suivi de l'évolution du combustible : contrôle des déclarations des opérateurs



Expérience SONGS,
à San Onofre, USA

Méthode de détection des antineutrinos

- Détection basée sur la réaction β inverse : $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$
 $\sigma_{\bar{\nu}} \approx 10^{-19} - 10^{-18}$ barns avec seuil à 1,8 MeV



- Utilisation de liquide scintillant :
 - Liquide organique, contenant beaucoup d'hydrogène, cible des antineutrinos
 - Et émetteur de lumière en présence de rayonnements ionisants
 - e^+ annihilé instantanément :
signal prompt
 - Capture neutron $\sim 30 \mu s$:
signal retardé
 - Dopage au gadolinium pour améliorer l'absorption des neutrons
 - Lumière récoltée par de nombreux tubes photomultiplicateurs (PMT)

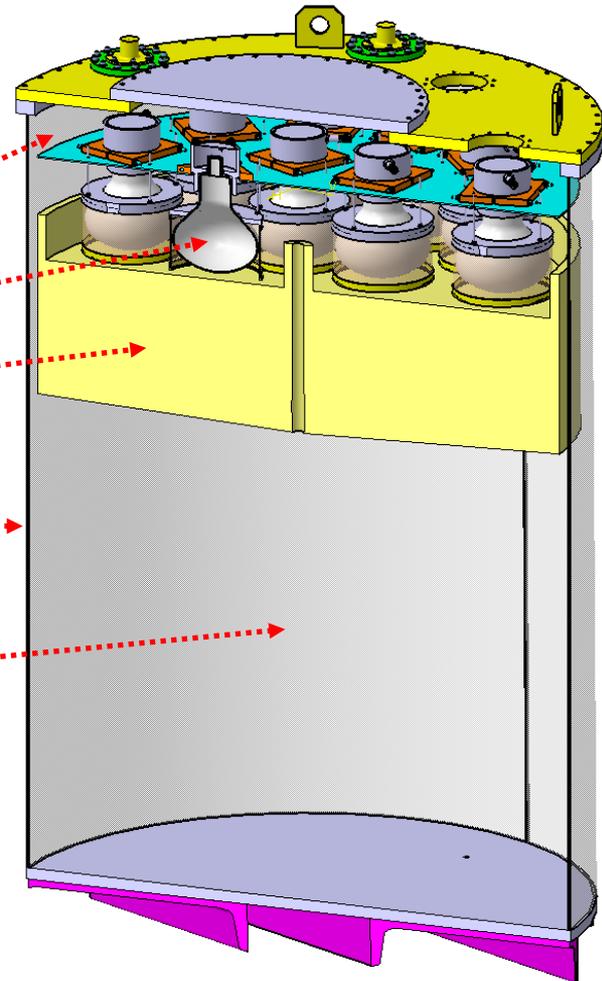
Design du détecteur Nucifer (1)

- Les liquides scintillants sont fragiles :
 - Dégradés par l'oxygène
 - Compatibles qu'avec quartz, acrylique, et téflon

Atmosphère d'azote
16 tubes photomultiplicateurs
Buffer acrylique

Cuve acier inox + téflon

Liquide cible $\sim 0,8 \text{ m}^3$

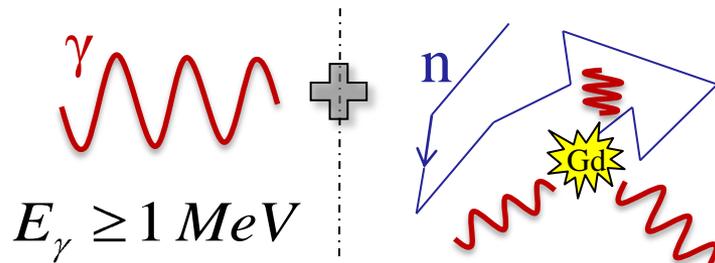


- Aujourd'hui presque tous les éléments ont été livrés
- PMT en cours de fixation sur le buffer

La difficulté : extraire le signal

Signature $\bar{\nu}$: 2 signaux de qq MeV corrélés en temps

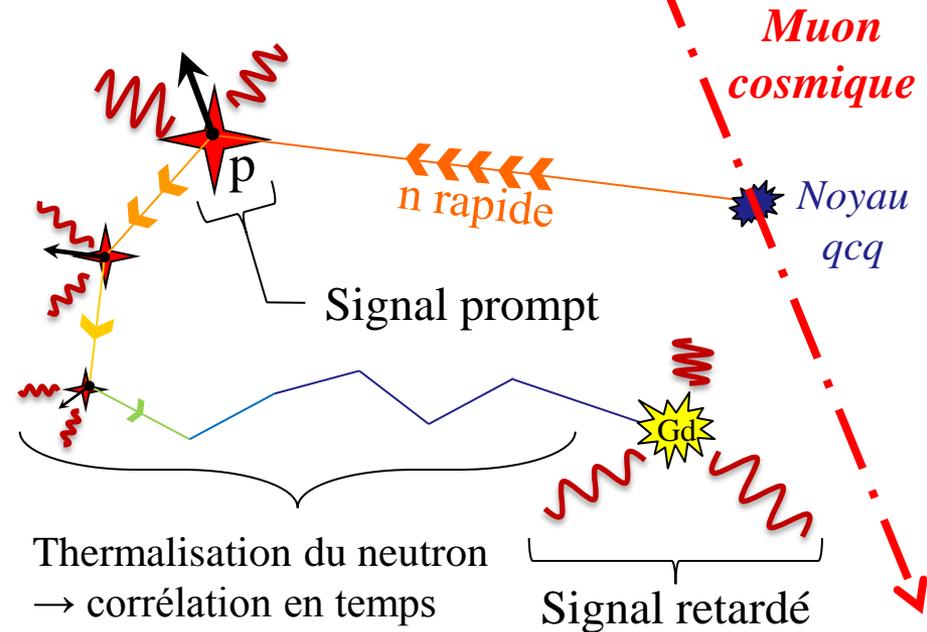
Bruit de fond aléatoire



Radioactivité naturelle ou réacteur

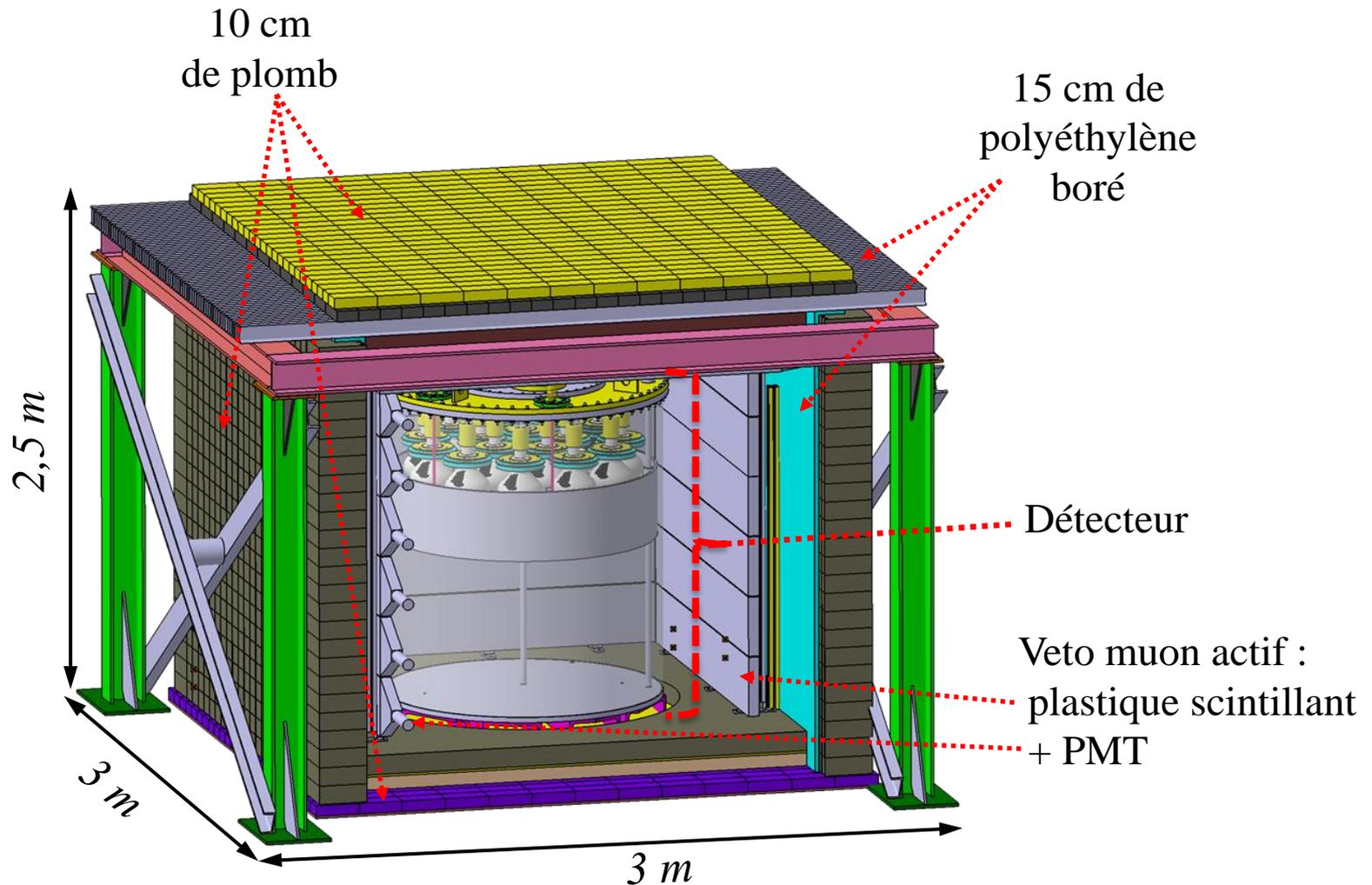
- Corrélation aléatoire mais qui reste possible
- Blindage contre les gammas : 10 cm de plomb (~ 40 tonnes)
- Blindage contre les neutrons : 15 cm de polyéthylène boré (~5 t)
- Matériaux bas bruit de fond

Bruit de fond corrélé



- Maximum de matière "au dessus"
- Ajout d'un veto muon actif
- Rejet du signal de neutron rapide

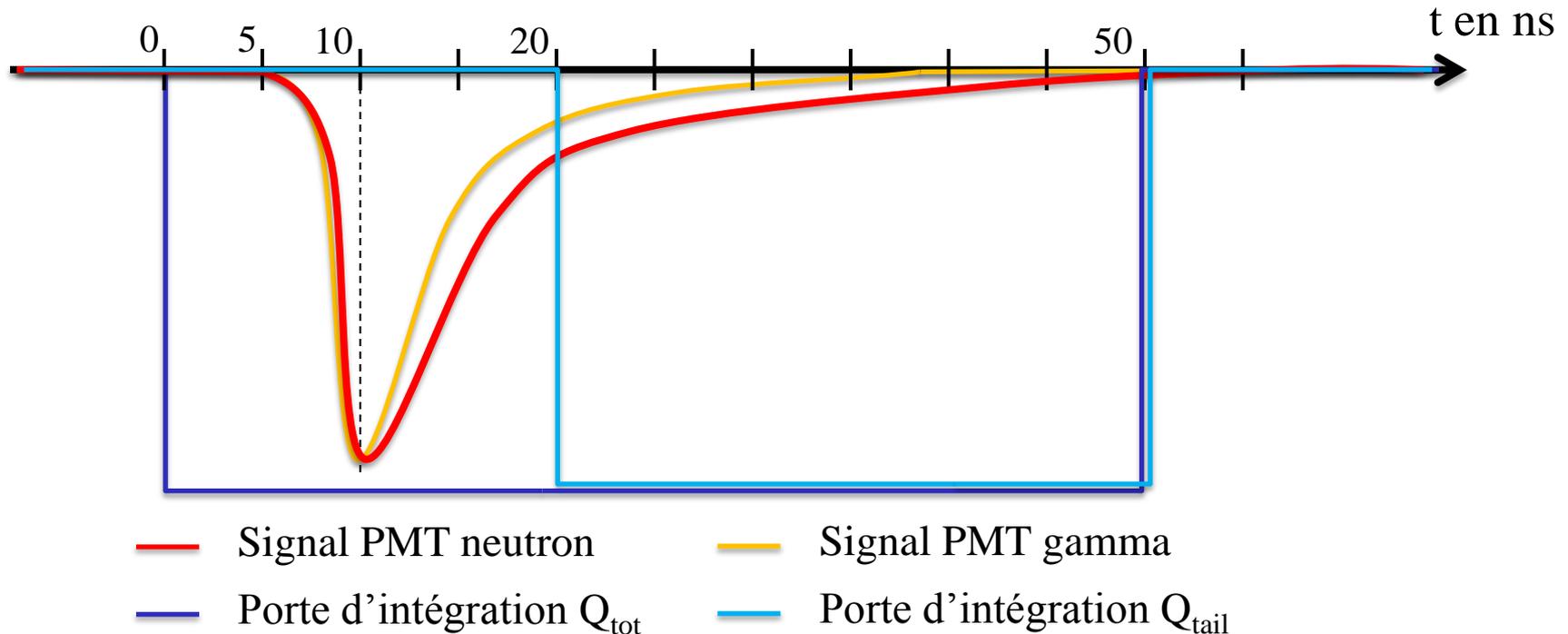
Design du détecteur Nucifer (2)



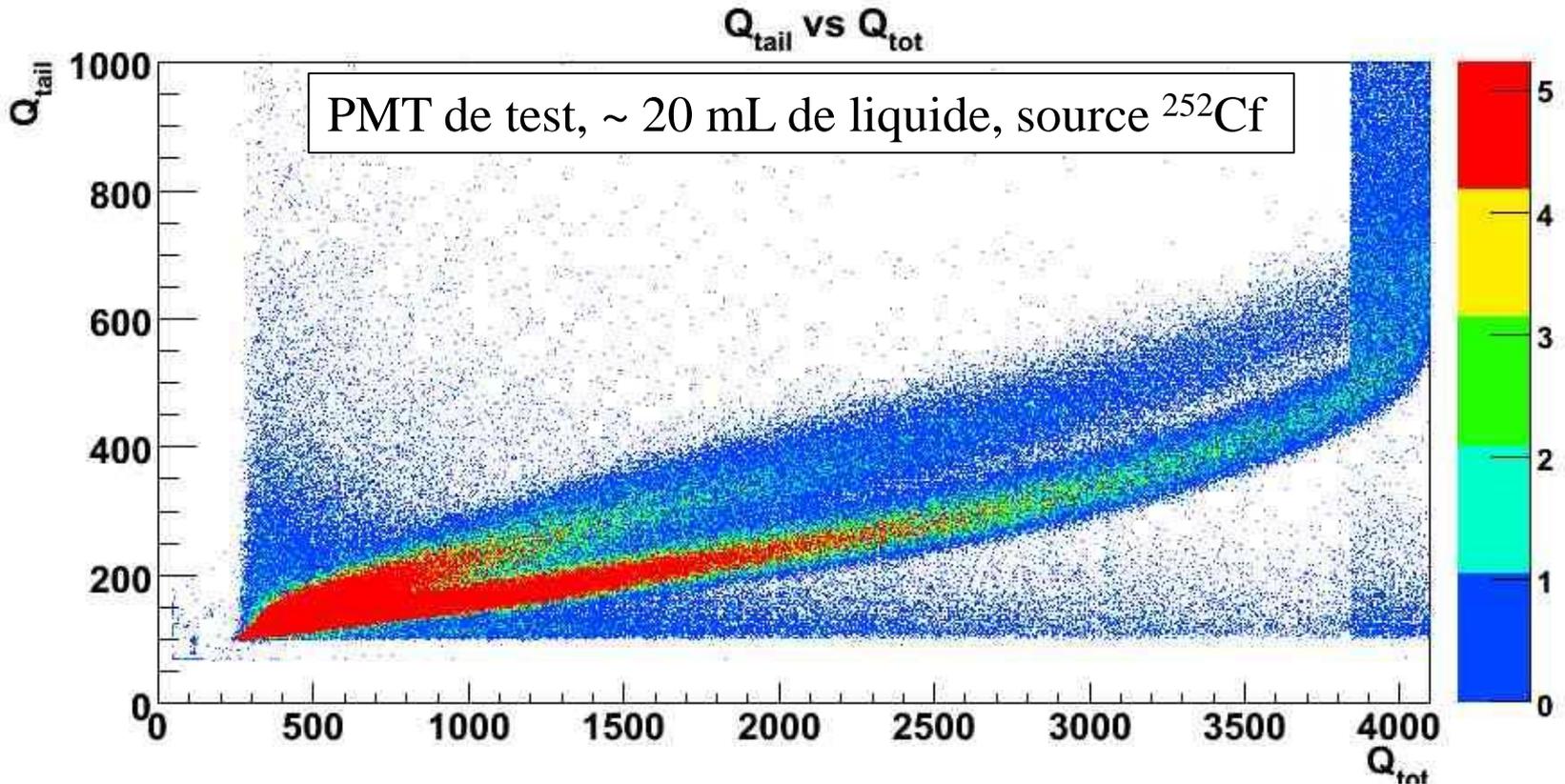
Total : ~ 60 tonnes

Rejet du bruit de fond corrélé

- Discrimination des signaux par leur forme (Pulse Shape Discrimination) :
 - La réponse du liquide scintillant à un neutron rapide est plus étalée dans le temps que celle à un gamma
 - Le PMT fournit une charge proportionnelle à la lumière reçue
- Idée simple : intégration de la charge totale du pulse et de sa queue

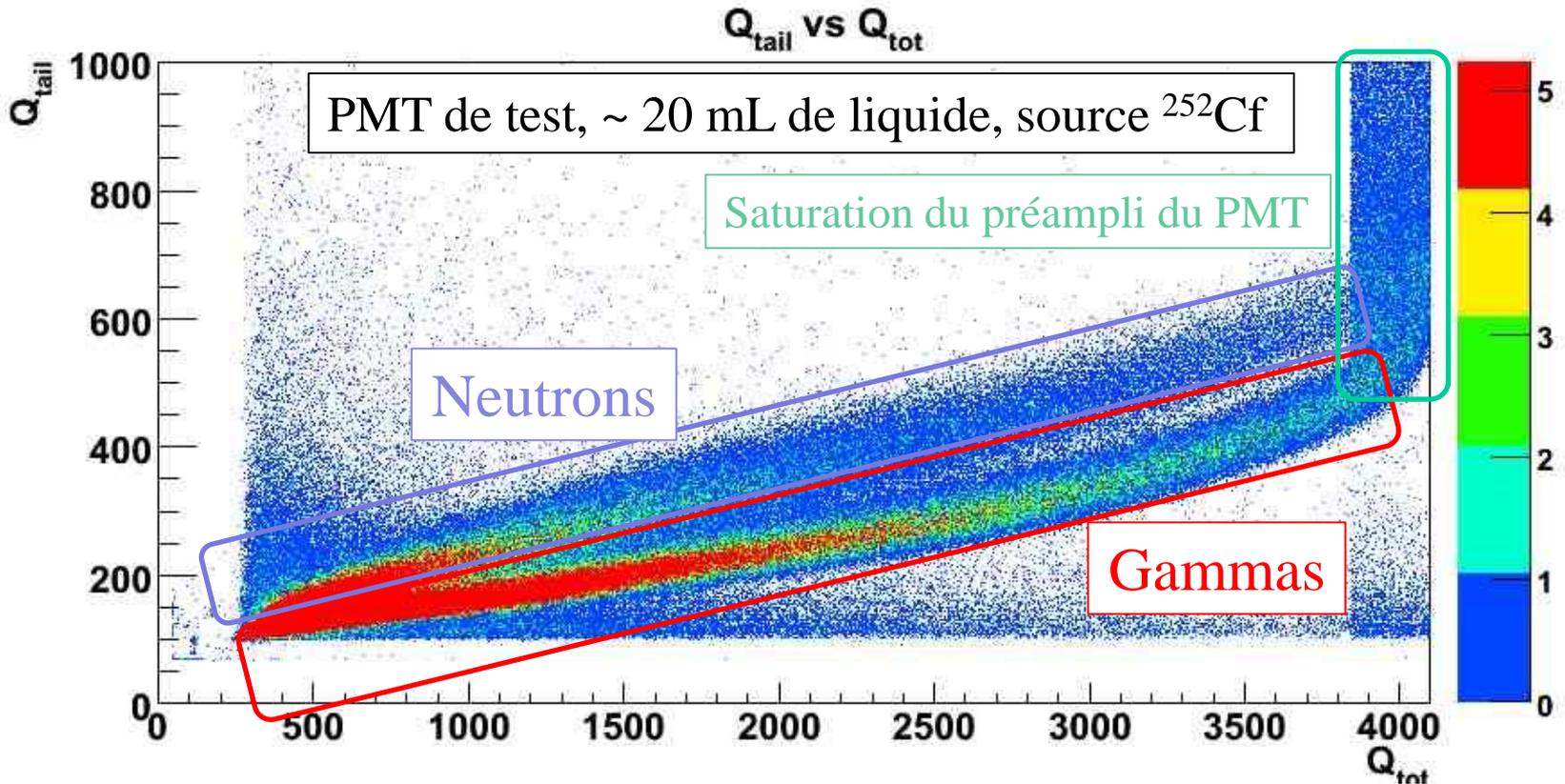


Analyse de forme



- Plot brut de notre banc de test de liquide scintillant
- 2 droites se dégagent, surtout à haute énergie (canal 1000 ~ 1,3 MeV)

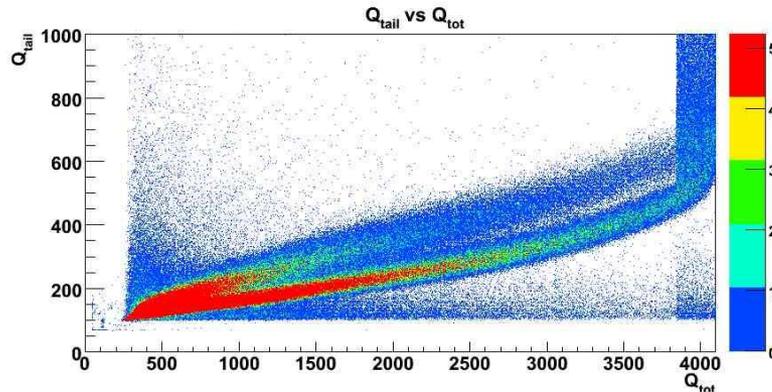
Analyse de forme



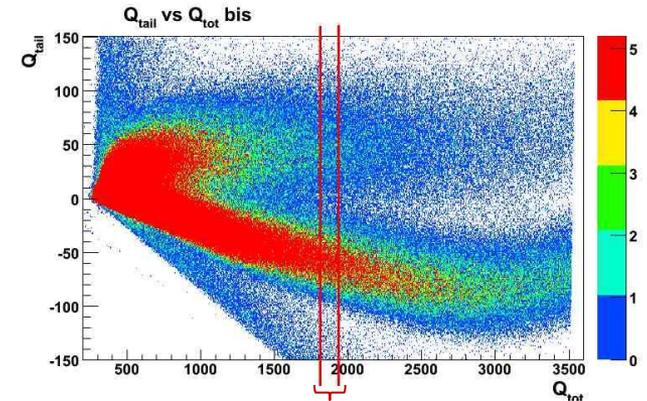
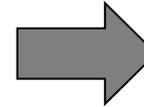
- Plot brut de notre banc de test de liquide scintillant
- 2 droites se dégagent, surtout à haute énergie (canal 1000 ~ 1,3 MeV)
- Encourageant mais limité à une petite cellule en quartz
 - Pas de réflexion, pas d'effet de volume...

Analyse des données avec ROOT

- Macro permettant l'analyse directe à partir des données binaires



Plot des données brutes



Rotation, coupe, rebinning

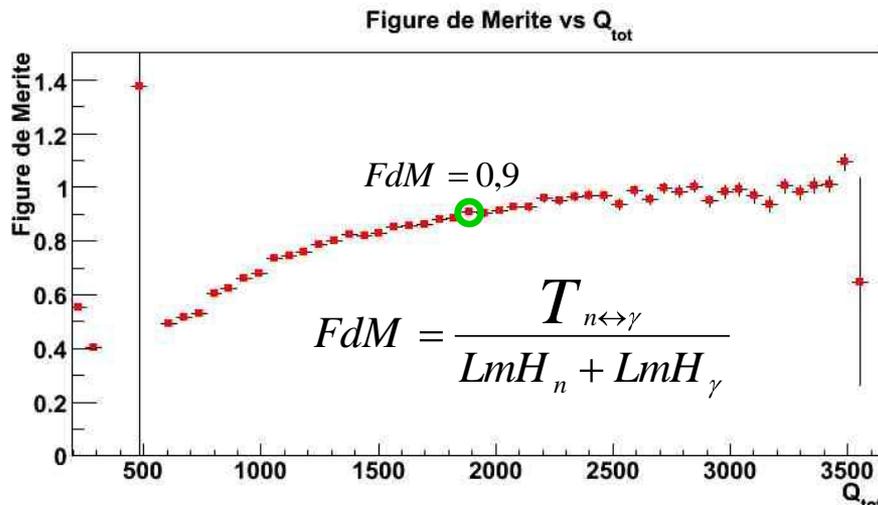
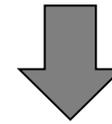
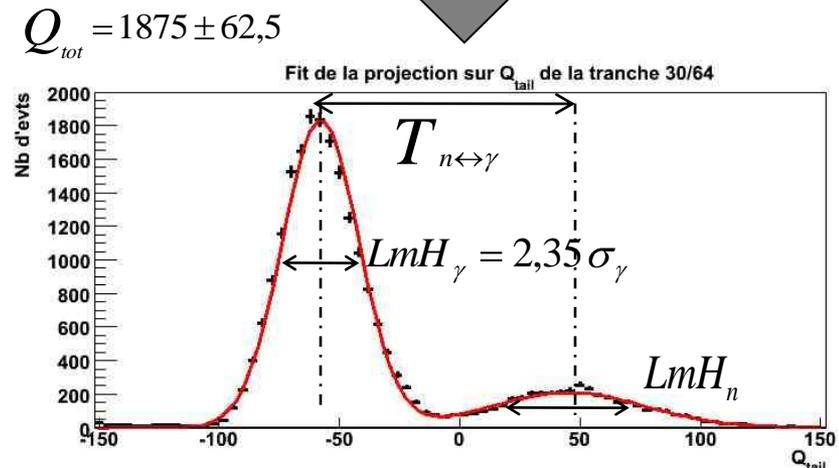


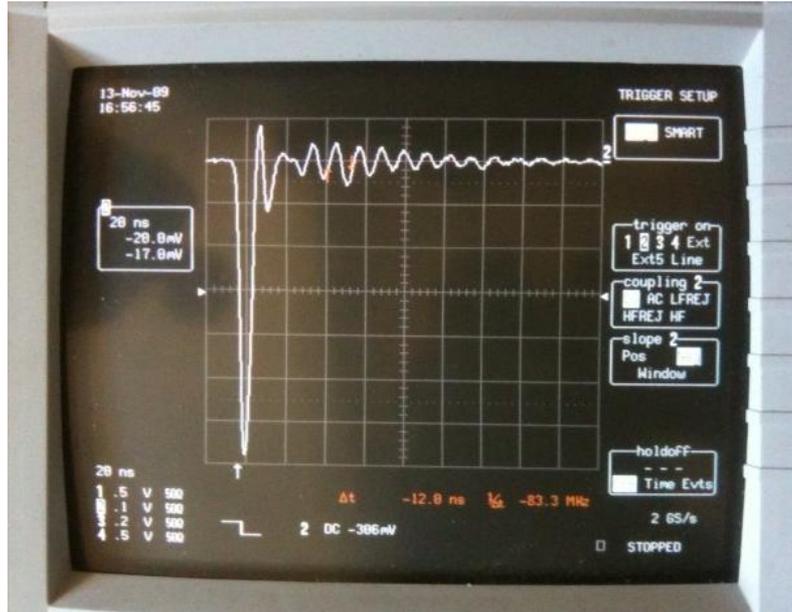
Figure de Mérite en fonction de Q_{tot}



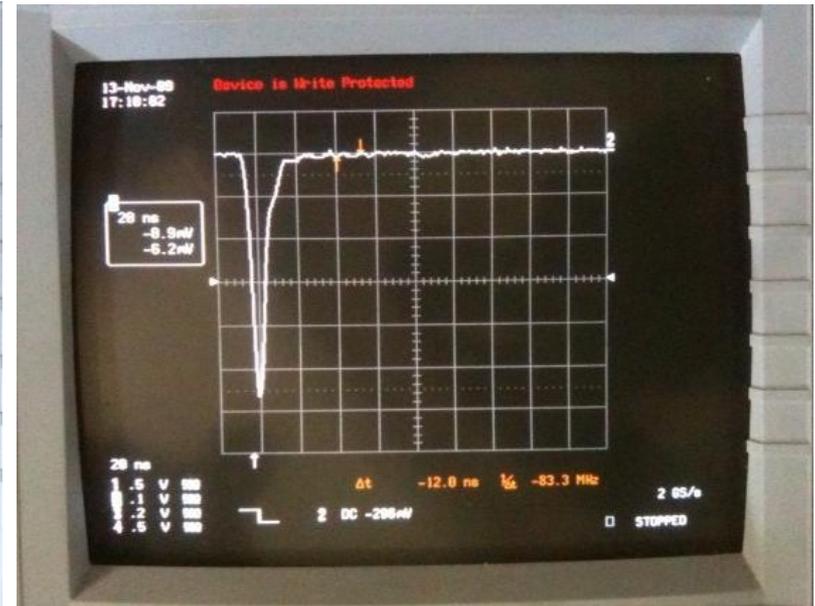
Projection sur y, fit avec 2 gaussiennes

Test des PMTs

- Passage aux test avec les vrais PMT de Nucifer (8 inches)
 - Utilisation de bases (constructeur) à grande dynamique de charge :



Base améliorée constructeur

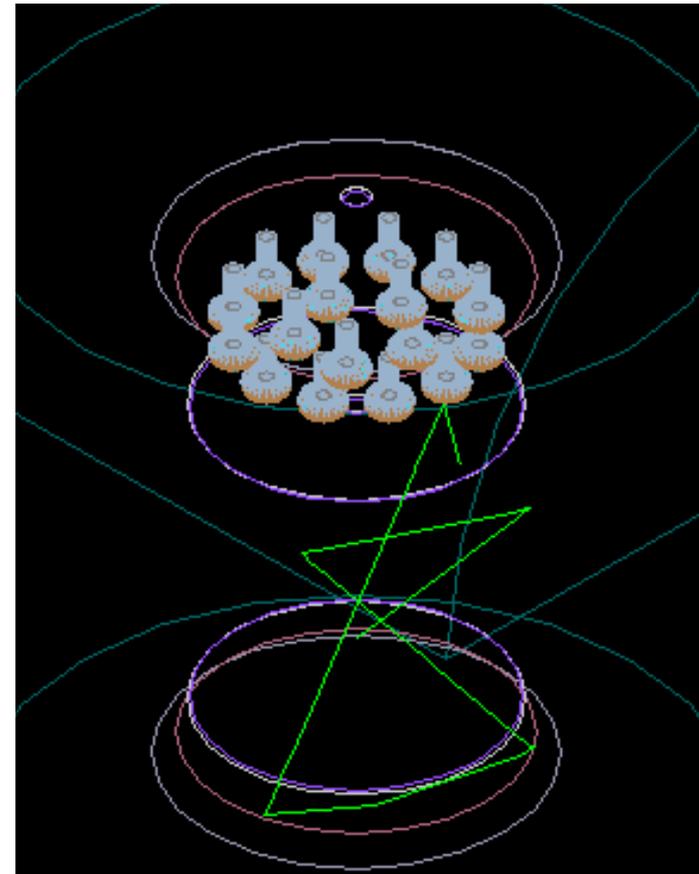
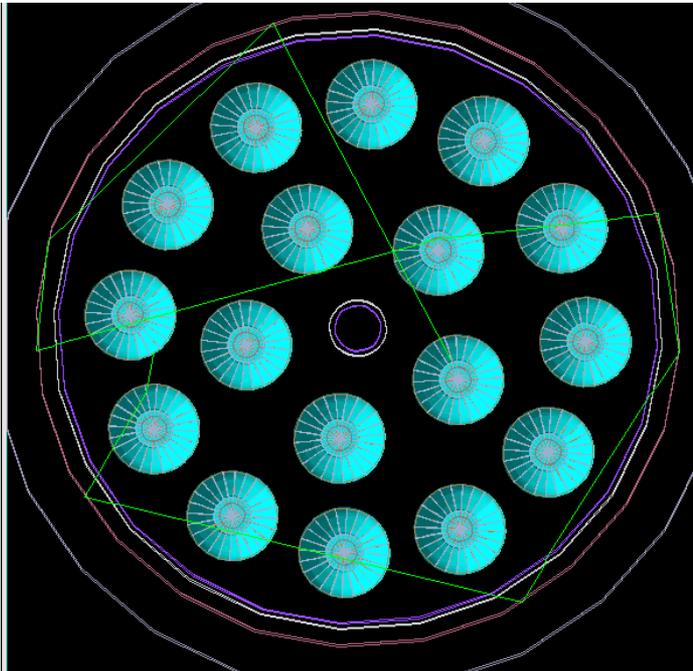


Base standard soudée au labo

- Ces oscillations ne permettent pas la PSD
- Travail sur les bases pour garder la dynamique et supprimer les oscillations

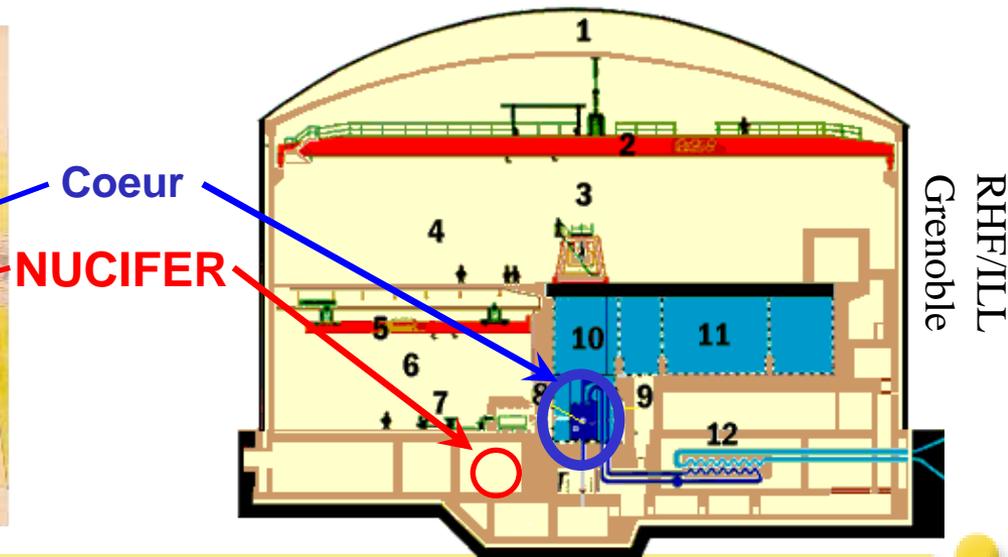
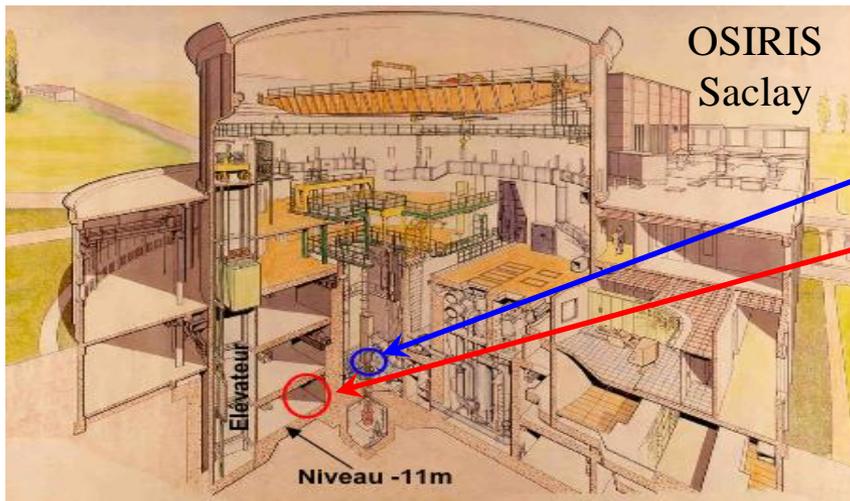
Simulation GEANT4

- Stade de la prise en main
- Simulation très inspirée de celle de Double Chooz
- Effet de volume pour la PSD, réponse du détecteur aux sources de calibration...



Conclusions et perspectives

- Détecteur $\bar{\nu}$ pour le monitoring de réacteur : puissance et évolution
- Expérience en cours d'intégration
- Plan de déploiement :
 - Test à Saclay en laboratoire de décembre à mars
 - Test à au réacteur Osiris de Saclay à partir d'avril
 - Test au RHF de Grenoble en 2011 (combustible ^{235}U à 93%)
 - Test sur un réacteur EDF en 2012 ??
- But final : capacité de réjection du bruit de fond et sensibilité au plutonium
 - **Vers une application sociétale du neutrino**



Questions ?

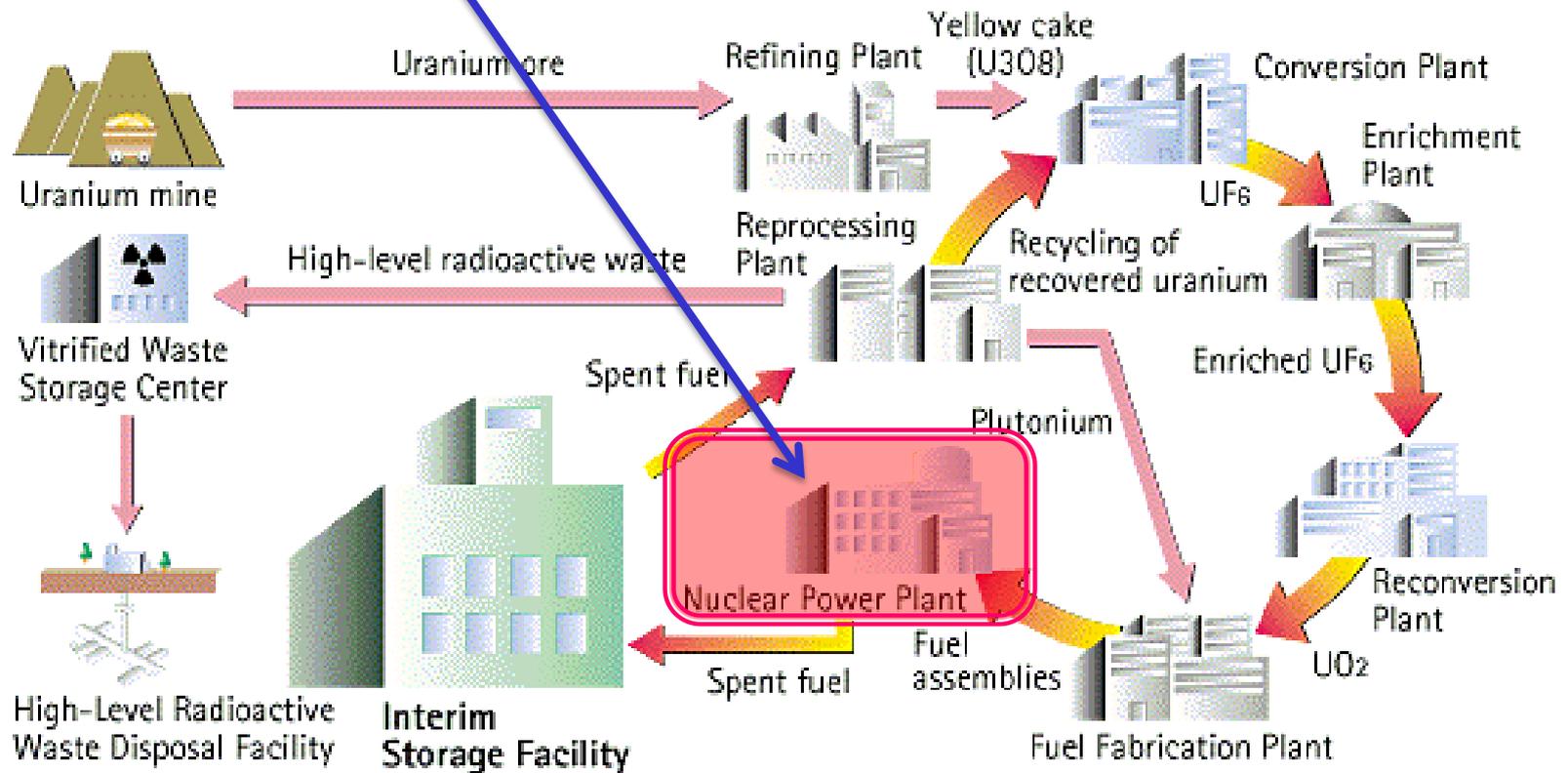


Bombe nucléaire à fission (bombe A)

- Création très rapide d'une masse très surcritique : $k_{\text{eff}} > 2$
 - Isotopes particuliers : $\sigma_{\text{fission}} \gg \sigma_{\text{absorption}}$, $k_{\text{inf}} > 2,5 \Rightarrow Z > 91$
- 2 méthodes pratiques (avec les isotopes suffisamment abondants) :
 - Insertion d'une barre dans un tube le tout en ^{235}U pur (> 95%), > 40 kg
 - Implosion d'une sphère creuse de ^{239}Pu pur (> 95%), > 11 kg
 - Cinétique < 1 ms : déclenchement par explosif classique
- Pour ^{235}U pur : extraction depuis l' U_{nat} (0,7% ^{235}U , le reste ^{238}U)
 - Milliers d'étages de diffusion gazeuse ou de centrifugation
- Pour ^{239}Pu : n'existe pas à l'état naturel ($T_{1/2} = 240\,000$ ans)
 - Création à partir de ^{238}U : $^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow ^{239}_{92}\text{U} \xrightarrow{\beta^- 23\text{min}} ^{239}_{93}\text{Np} \xrightarrow{\beta^- 2,3\text{j}} ^{239}_{94}\text{Pu}$
 - Problème : on veut ^{239}Pu pur, et $^{239}_{94}\text{Pu} + {}^1_0n \rightarrow ^{240}_{94}\text{Pu}$ etc...
 - ^{240}Pu : non fissile, = impureté
 - ^{241}Pu et + : émetteurs neutrons spontanés, la réaction démarre trop tôt et n'est pas "assez" critique : la masse chauffe et se dilate
 - Optimum création ^{239}Pu / non création ^{240}Pu : 3-6 mois d'irradiation
 - Extraction chimique depuis combustible (faiblement) utilisé : faisable
 - Extraction isotopique de ^{239}Pu de $^{238,240,241}\dots\text{Pu}$: quasi impossible

Nucifer dans le cycle du combustible

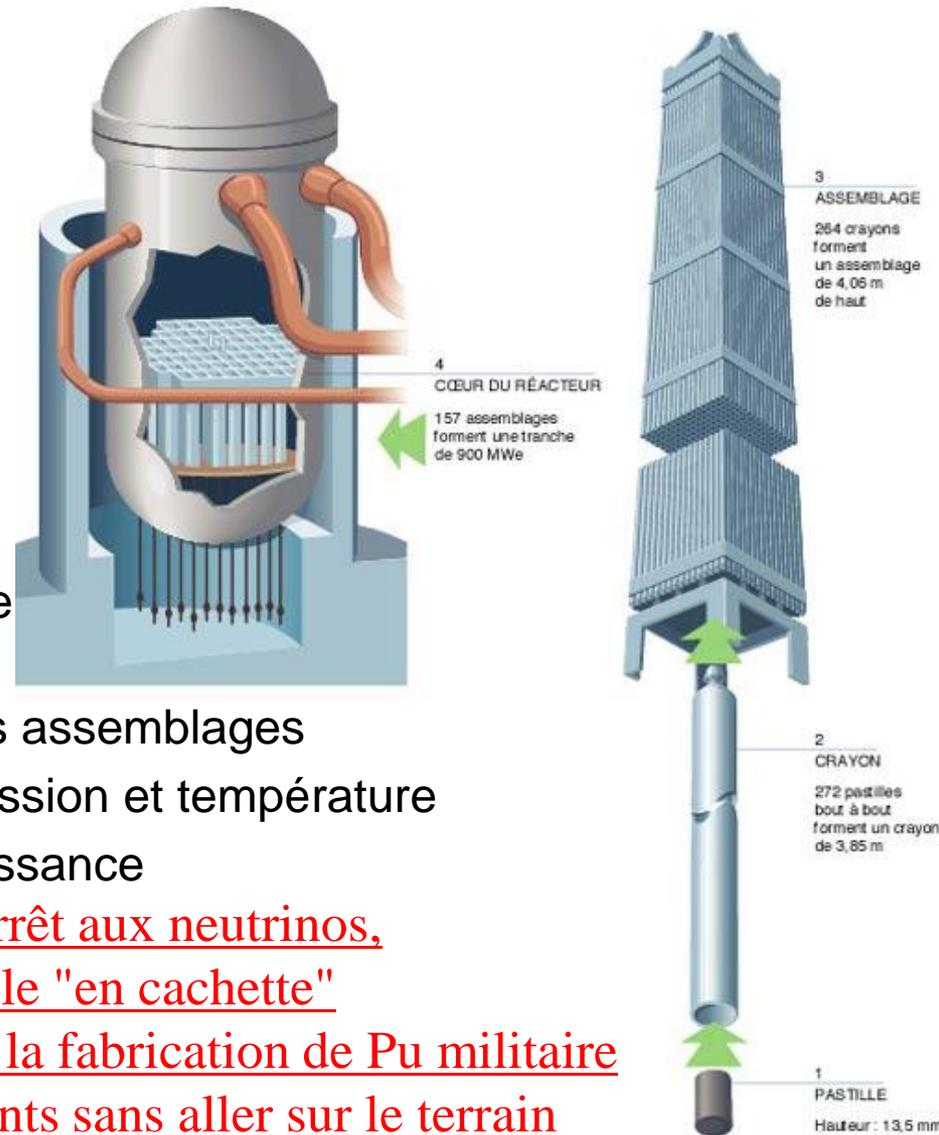
The Nuclear Fuel Cycle



But : surveiller la production de plutonium

Le Réacteur à eau pressurisée

- Cycle normal : 12-18 mois
- Rechargement par tiers : chaque assemblage subi 3 cycles
- Tous les isotopes de Pu sont alors présents en quantités significatives
- Après chute des barres :
 - 3+ jours pour descendre en pression (depuis 155 bar) et température (décroissance de la puissance résiduelle)
 - Plusieurs jours pour sortir les assemblages
 - 3 jours pour remonter en pression et température
 - 3 jours pour remonter en puissance

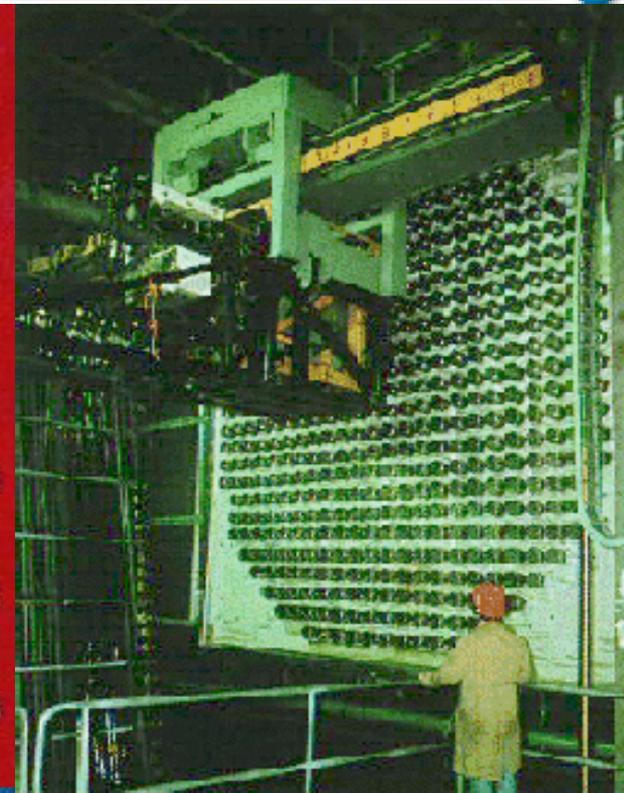
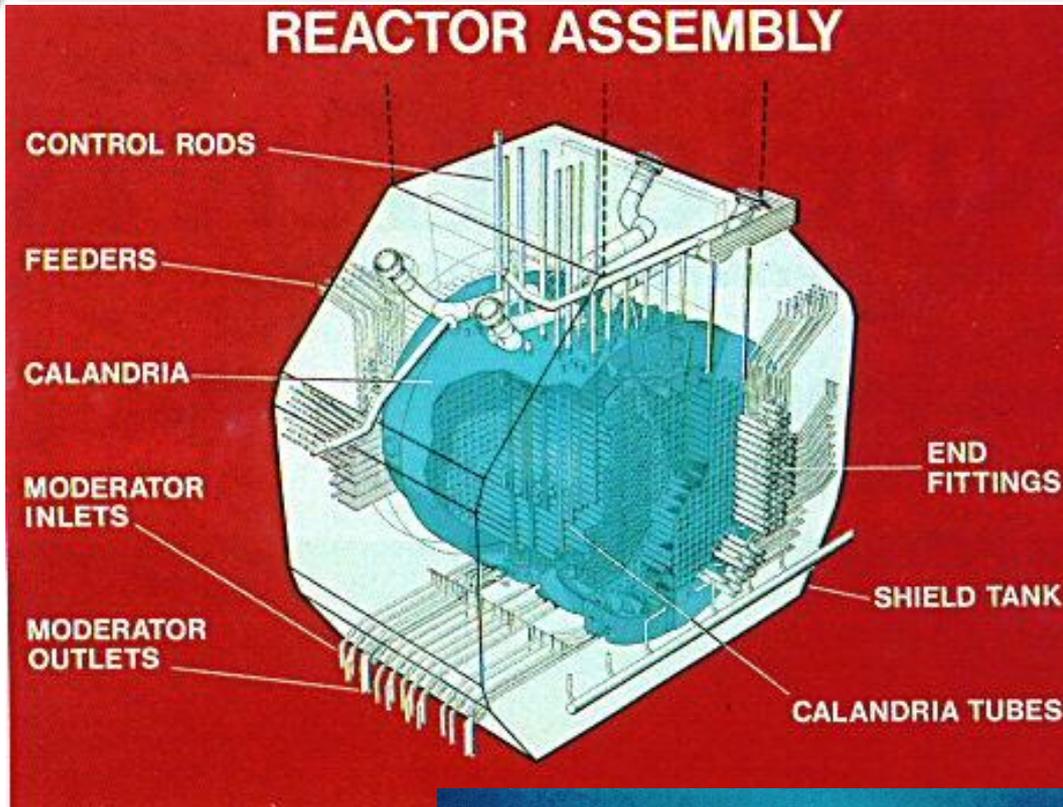


Impossible de camoufler un arrêt aux neutrinos,
donc de sortir du combustible "en cachette"

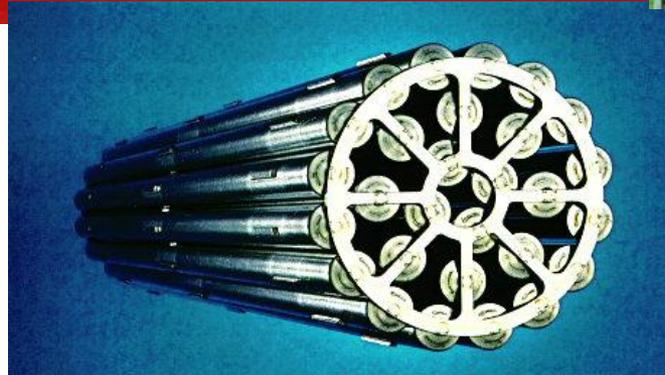
Si cycle normal, combustible impropre à la fabrication de Pu militaire

Contrôle des déclarations des exploitants sans aller sur le terrain

Le CANDU : un réacteur à chargement continu



Chargement / déchargement
en continu et en puissance
d'assemblages
Facile de ne laisser des
assemblages que 3 mois

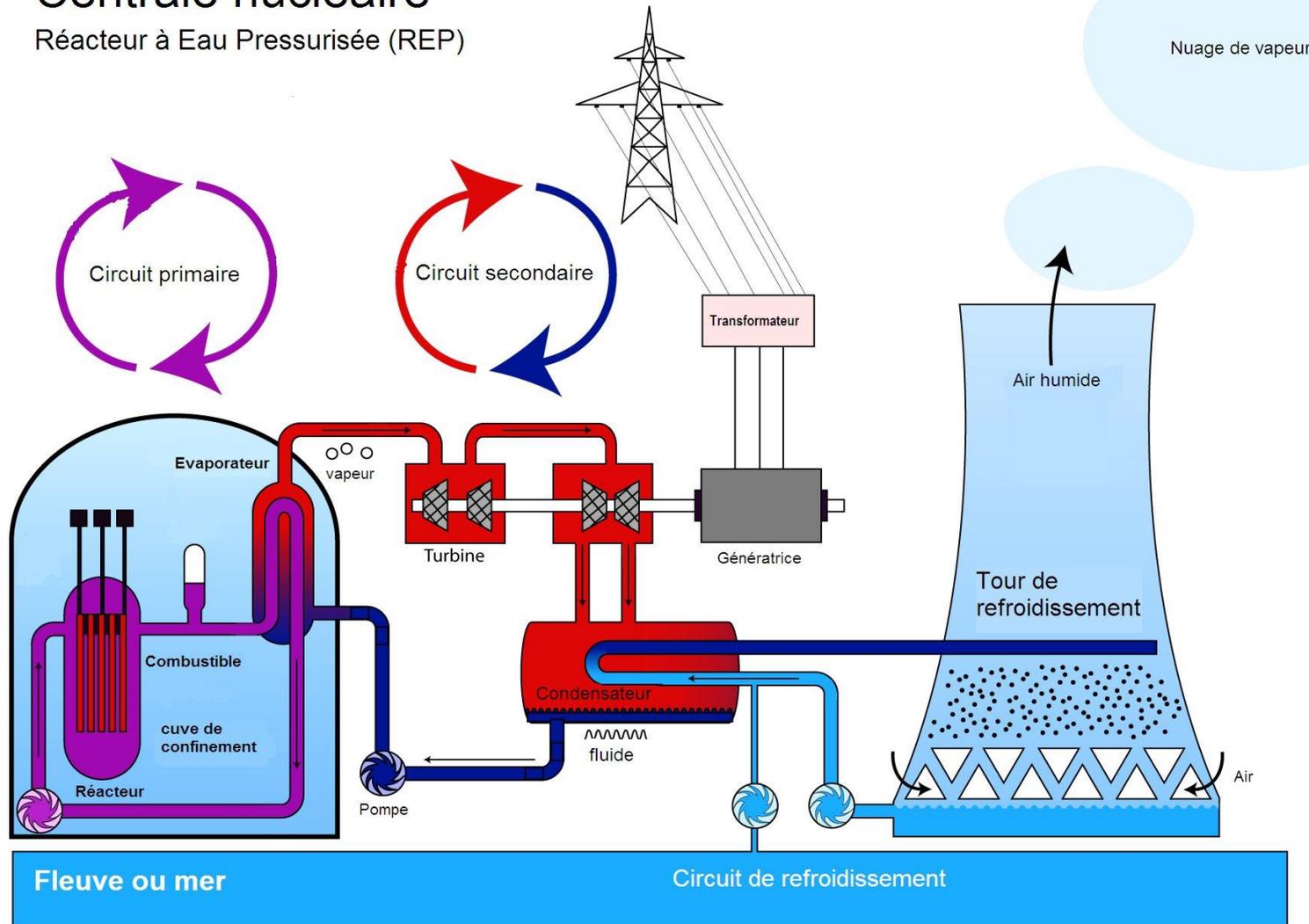


Facile de camoufler que qq
assemblages sont remplacés
Sensibilité de la sonde
neutrino au Pu
probablement trop faible
Réacteurs proliférant (Inde)

Centrale nucléaire

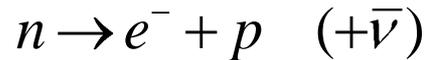
Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)

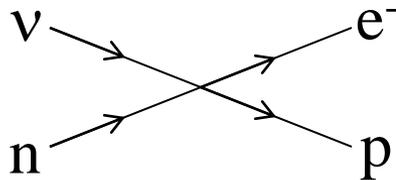


Neutrino et antineutrino

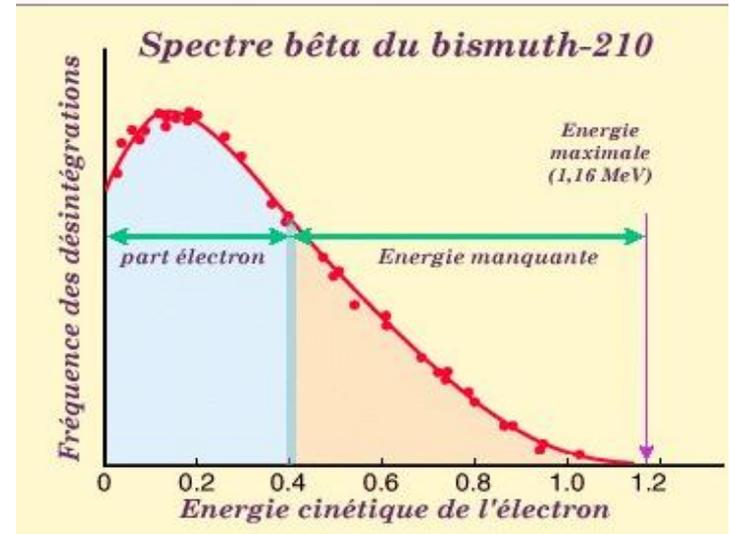
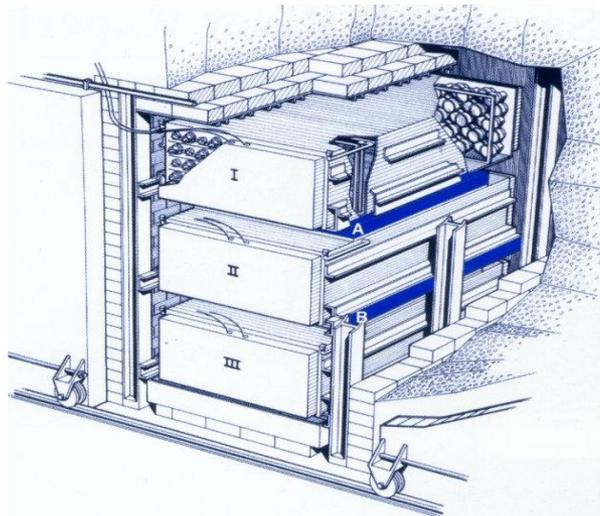
- Postulé en 1930 par Pauli pour expliquer les spectres beta



- Intégré à la théorie de l'interaction faible en 1934 par Fermi



- Observé en 1956 par Reines et Cowan



- En 2009 :

- Lepton neutre
- Masse m : $0 < m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}$
- Spin : $\frac{1}{2}$
- 3 saveurs : ν_e, ν_μ, ν_τ
- Interactions : faible (et gravitationnelle)
- Longueur d'atténuation : 9,5 a.l. dans l'eau (!)

Design du détecteur Nucifer (2)

