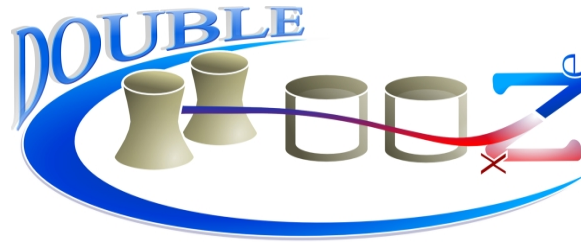




énergie atomique • énergies alternatives



---

# Double Chooz

a search for the  $\theta_{13}$  mixing parameter

---

Journées des Jeunes Chercheurs 2010  
Angers



energie atomique • énergies alternatives



# Oscillations et $\theta_{13}$



- États propres de : **saveur** (interaction)  $\neq$  **masse** (propagation)
  - > Matrice de mélange. Peut être caractérisée avec **4 paramètres** : 3 angles  $\theta_{ij}$  et 1 phase  $\delta_{CP}$  (ici,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  et  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ )

$$\begin{array}{c} \text{saveur} \end{array} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{array}{c} \text{matrice de mélange} \end{array} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & c_{23} & s_{23} & \\ & -s_{23} & c_{23} & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & e^{-i\delta} s_{13} \\ & 1 & \\ -e^{i\delta} s_{13} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{array}{c} \text{masse} \end{array} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- **Oscillation =**  
**production** d'un  $\nu$  avec une certaine saveur, puis **propagation**  
**→ probabilité non-nulle d'un changement de saveur**



- États propres de : **saveur** (interaction)  $\neq$  **masse** (propagation)
  - > Matrice de mélange. Peut être caractérisée avec **4 paramètres** : 3 angles  $\theta_{ij}$  et 1 phase  $\delta_{CP}$  (ici,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  et  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ )

matrice de mélange

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & e^{-i\delta} s_{13} \\ & 1 & \\ -e^{i\delta} s_{13} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

mesuré

$\sin^2(2\theta_{23}) \sim 1$

mesuré

$\sin^2(2\theta_{12}) \sim 0.8$



energie atomique • energies alternatives



- États propres de : **saveur** (interaction)  $\neq$  **masse** (propagation)
  - > Matrice de mélange. Peut être caractérisée avec **4 paramètres** : 3 angles  $\theta_{ij}$  et 1 phase  $\delta_{CP}$  (ici,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  et  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ )

matrice de mélange

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & e^{-i\delta} s_{13} \\ & 1 & \\ -e^{i\delta} s_{13} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

mesuré

Inconnu !

Limite (de CHOOZ) :

$\sin^2 2\theta_{13} < 0,15$  avec 90 % C.L.

pour  $\Delta m_{31}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$

mesuré

- Deux paramètres restent inconnus :  $\theta_{13}$  et  $\delta_{CP}$ 
  - > Recherche de violation CP dans le secteur des  $\nu$  nécessite d'abord une mesure de  $\theta_{13}$   $\rightarrow$  **Double Chooz**



energie atomique • énergies alternatives



# Double Chooz : oscillations de $\bar{\nu}_e$ de réacteurs

# La collaboration Double Chooz



energie atomique • energies alternatives



**Brazil**

CBPF  
UNICAMP  
UFABC



**France**

APC  
CEA/DSM/IRFU  
SPP  
SPHn  
SEDI  
SIS  
SENAC  
CNRS/IN2P3:  
Subatech  
IPHC  
ULB (Belgium)



**Germany**

EKU Tübingen  
MPIK  
Heidelberg  
TU München  
RWTH Aachen  
U. Hamburg



**Japan**

Tohoku U.  
Tokyo Inst. Tech.  
Tokyo Metro. U.  
Niigata U.  
Kobe U.  
Tohoku Gakuin  
U.  
Hiroshima Inst  
Tech.



**Russia**

INR RAS  
IPC RAS  
RRC Kurchatov



**Spain**

CIEMAT-Madrid



**UK**

Sussex

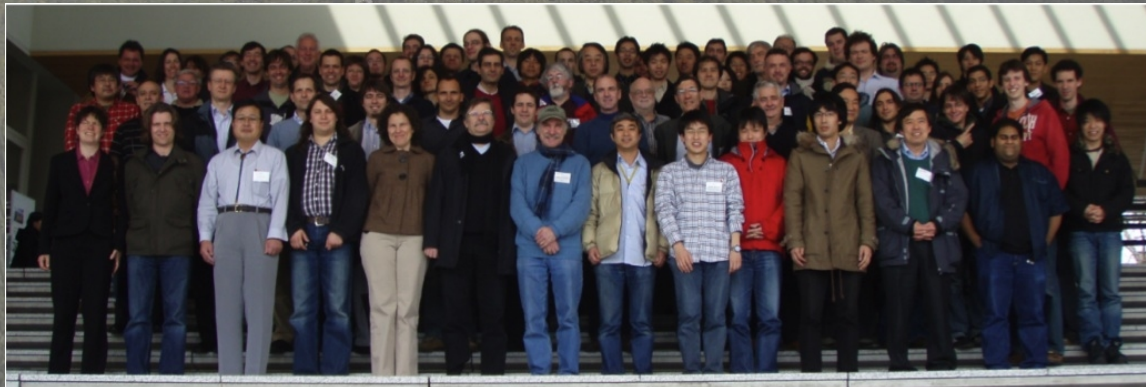


**USA**

U. Alabama  
ANL  
U. Chicago  
Columbia U.  
UCDavis  
Drexel U.  
IIT  
KSU  
LLNL  
MIT  
U. Notre Dame  
Sandia National  
Laboratories  
U. Tennessee

Spokesperson: H. de Kerret (IN2P3)  
Project Manager: Ch. Veyssière (CEA-Saclay)

Web Site: [www.doublechooz.org/](http://www.doublechooz.org/)





energie atomique • energies alternatives



- **Double Chooz** : expérience, réacteurs de Chooz, Ardennes fr.
  - > 2x4,27 GWth : source **intense et pure** de  $\bar{\nu}_e$  ( $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e \cdot s^{-1}$ )
  - >  **$E_\nu \sim \text{MeV}$** , détecteurs à **faible distance** des coeurs
    - pas d'effet de matière et mesure indép. du signe de  $\Delta m_{31}^2$



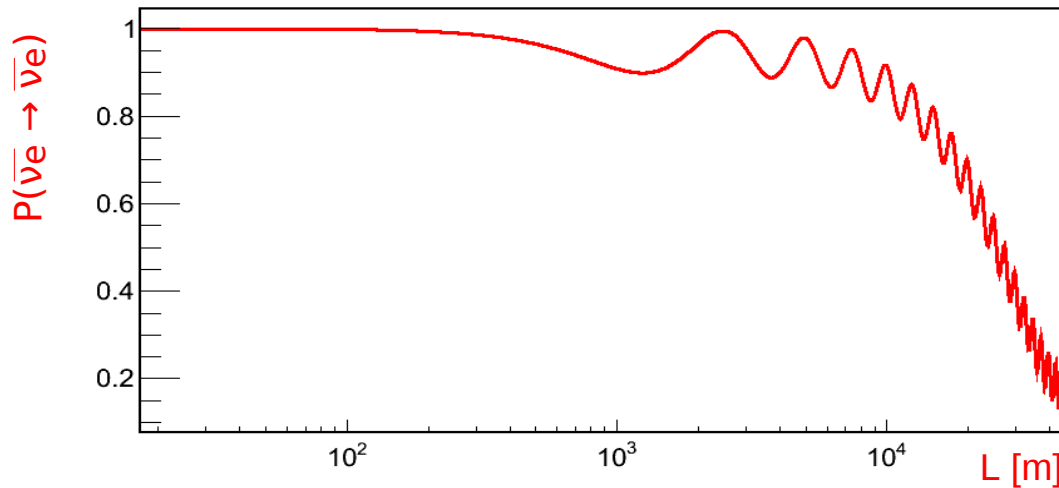


- **Double Chooz** : expérience, réacteurs de Chooz, Ardennes fr.
  - > 2x4,27 GWth : source **intense et pure** de  $\bar{\nu}_e$  ( $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e \cdot s^{-1}$ )
  - >  $E_\nu \sim \text{MeV}$ , détecteurs à **faible distance** des coeurs
    - pas d'effet de matière et mesure indép. du signe de  $\Delta m_{31}^2$
- **Expérience de disparition** – Probabilité de survie

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 L/E) - \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(1.27 \Delta m_{21}^2 L/E)$$

- **Double Chooz** : expérience, réacteurs de Chooz, Ardennes fr.
  - > 2x4,27 GWth : source **intense et pure** de  $\bar{\nu}_e$  ( $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e \cdot s^{-1}$ )
  - >  $E_\nu \sim \text{MeV}$ , détecteurs à **faible distance** des coeurs
    - pas d'effet de matière et mesure indép. du signe de  $\Delta m_{31}^2$
- **Expérience de disparition** – Probabilité de survie

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 L/E) - \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(1.27 \Delta m_{21}^2 L/E)$$



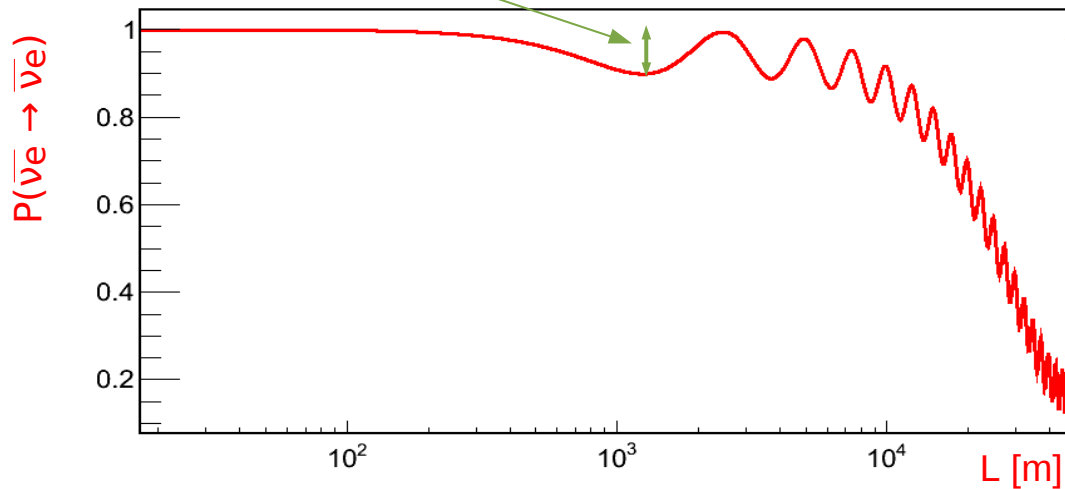
avec :

$$\begin{aligned} \sin^2(2\theta_{13}) &= 0,1 \\ \sin^2(2\theta_{12}) &= 0,8 \\ \Delta m_{31}^2 &= 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \Delta m_{21}^2 &= 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ E_\nu &= 3 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- **Double Chooz** : expérience, réacteurs de Chooz, Ardennes fr.
  - > 2x4,27 GWth : source **intense et pure** de  $\bar{\nu}_e$  ( $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e \cdot s^{-1}$ )
  - >  $E_\nu \sim \text{MeV}$ , détecteurs à **faible distance** des coeurs
    - pas d'effet de matière et mesure indép. du signe de  $\Delta m_{31}^2$

- **Expérience de disparition** – Probabilité de survie

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 L/E) - \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(1.27 \Delta m_{21}^2 L/E)$$

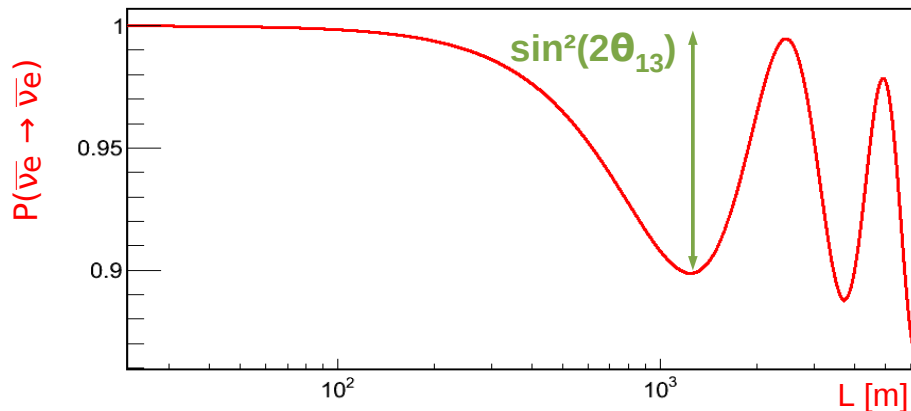


avec :

$$\begin{aligned} \sin^2(2\theta_{13}) &= 0,1 \\ \sin^2(2\theta_{12}) &= 0,8 \\ \Delta m_{31}^2 &= 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \Delta m_{21}^2 &= 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ E_\nu &= 3 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- **Double Chooz** : expérience, réacteurs de Chooz, Ardennes fr.
  - > 2x4,27 GWth : source **intense et pure** de  $\bar{\nu}_e$  ( $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e \cdot s^{-1}$ )
  - >  $E_\nu \sim \text{MeV}$ , détecteurs à **faible distance** des coeurs
    - pas d'effet de matière et mesure indép. du signe de  $\Delta m_{31}^2$

- **Expérience de disparition** – Probabilité de survie



avec :

$$\begin{cases} \sin^2(2\theta_{13}) = 0,1 \\ \sin^2(2\theta_{12}) = 0,8 \\ \Delta m_{31}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \Delta m_{21}^2 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ E_\nu = 3 \text{ MeV} \end{cases}$$

- Choix de  $L/E$  → mesure propre d'un seul paramètre :  $\sin^2(2\theta_{13})$ 
  - > Indépendance vis-à-vis de  $\delta_{CP}$  et  $\Delta m_{21}^2$

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(1.27 \Delta m_{31}^2 L/E)$$

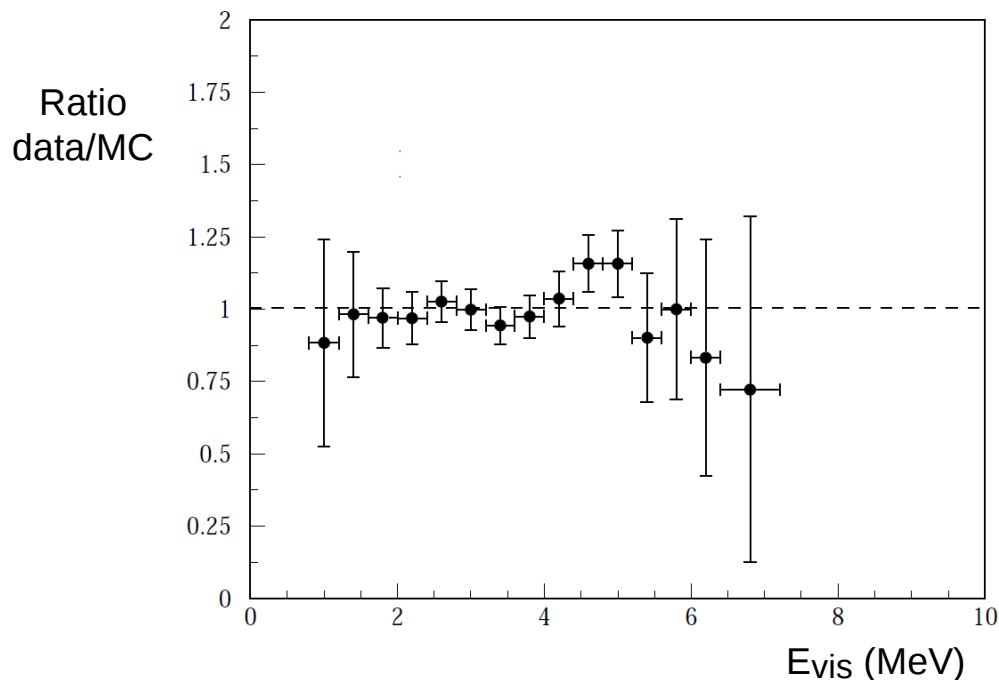


energie atomique • energies alternatives



# Amélioration de l'expérience CHOOZ Concept de Double Chooz

- Résultats de CHOOZ limités par stat. et syst. :  
R  $\neq$  1 si oscillation  
R = 1,01  $\pm$  2,8 % (stat)  $\pm$  2,7 % (syst)



- > Deux syst. principales : spectre des  $\bar{\nu}_e$  émis et coupures d'analyse
- > Principale limitation de CHOOZ : stabilité des liquides scintillants



- Résultats de CHOOZ limités par stat. et syst. :  
 $R = 1,01 \pm 2,8 \% \text{ (stat)} \pm 2,7 \% \text{ (syst)}$ 
  - > Deux syst. principales : spectre des  $\bar{\nu}_e$  émis et coupures d'analyse
  - > Principale limitation de CHOOZ : stabilité des liquides scintillants
- **Double Chooz** → prise de données plus longues, volume cible plus grand et efforts pour diminuer ces systématiques

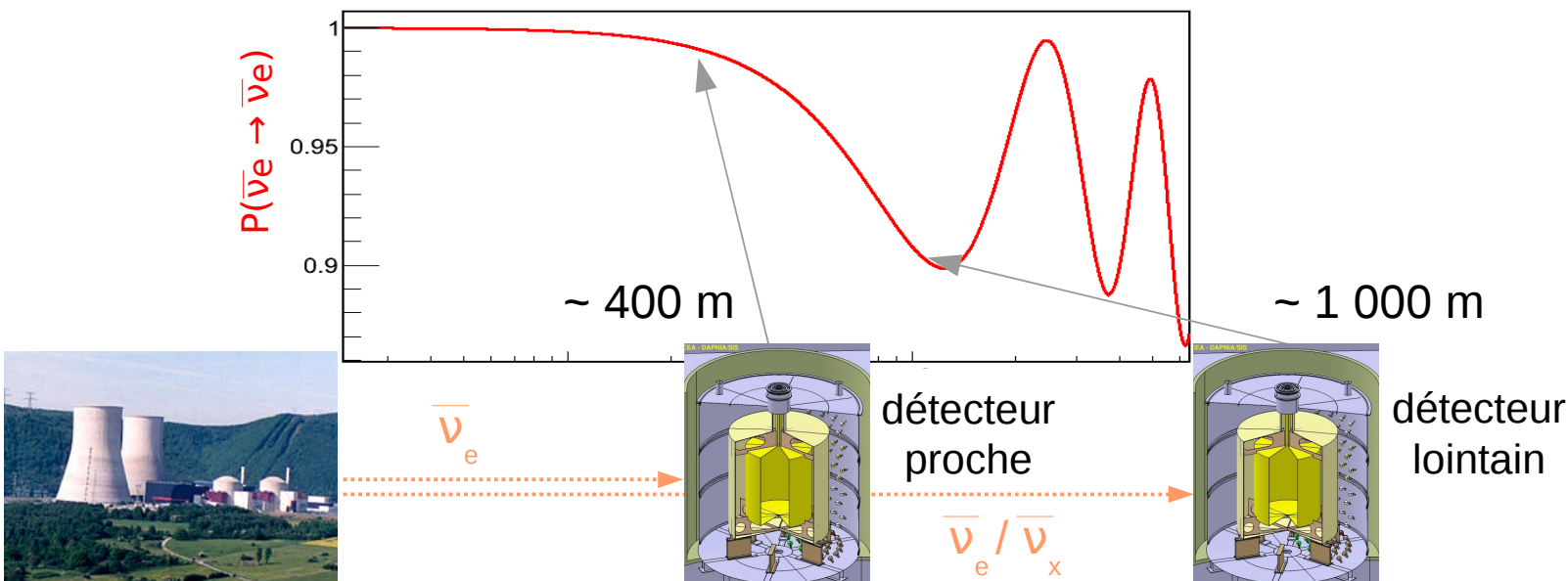
- Résultats de CHOOZ limités par stat. et syst. :

$$R = 1,01 \pm 2,8 \% \text{ (stat)} \pm 2,7 \% \text{ (syst)}$$

- > Deux syst. principales : spectre des  $\bar{\nu}_e$  émis et coupures d'analyse
- > Principale limitation de CHOOZ : stabilité des liquides scintillants

- **Double Chooz** → prise de données plus longues, volume cible plus grand et efforts pour diminuer ces systématiques

- > Concept de deux détecteurs avec zones cible identiques à deux distances des coeurs : avant et près du maximum d'oscillation

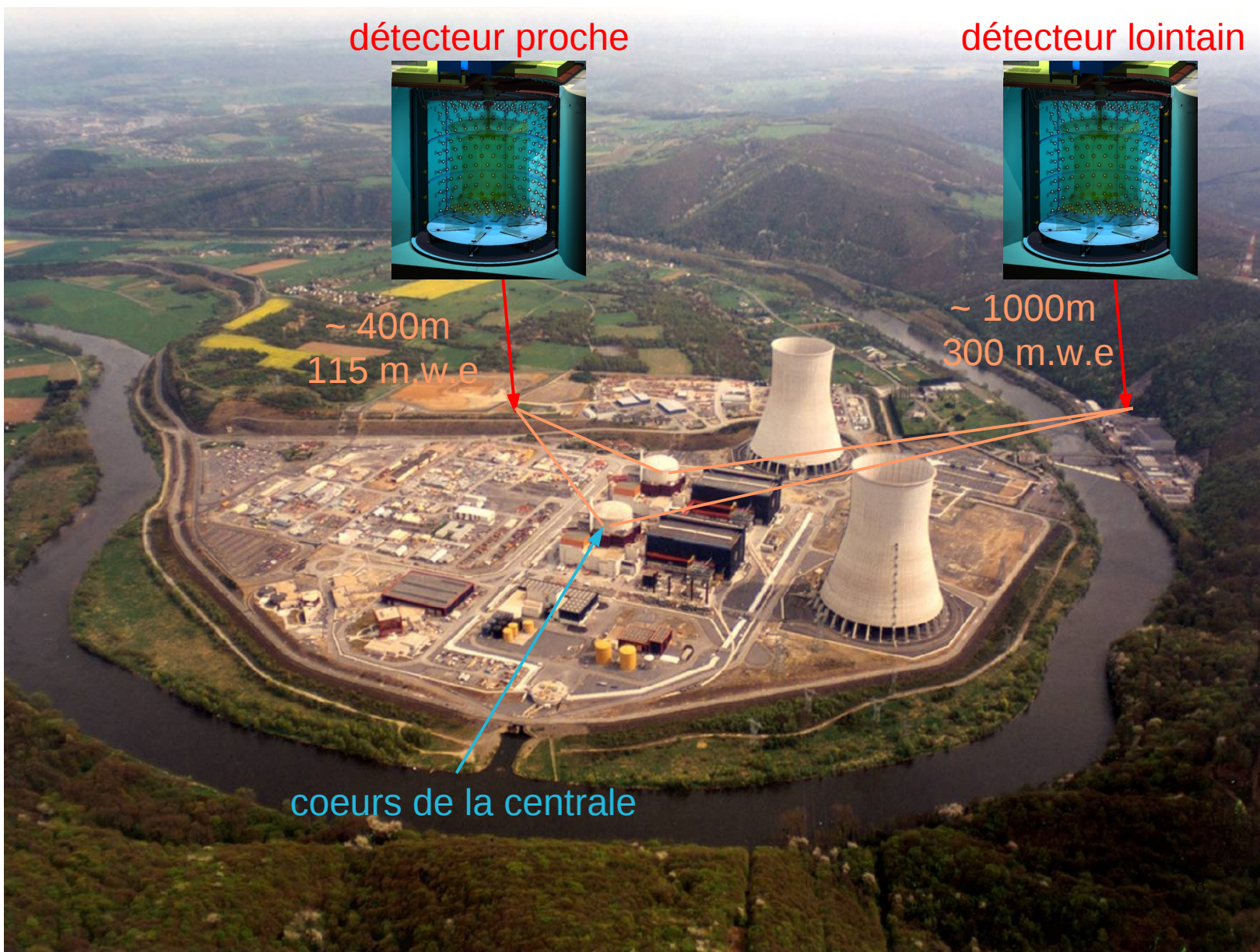




# Localisation – Centrale Nucléaire de Chooz B

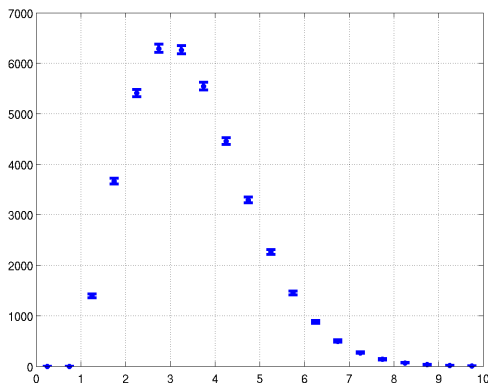


energie atomique • énergies alternatives





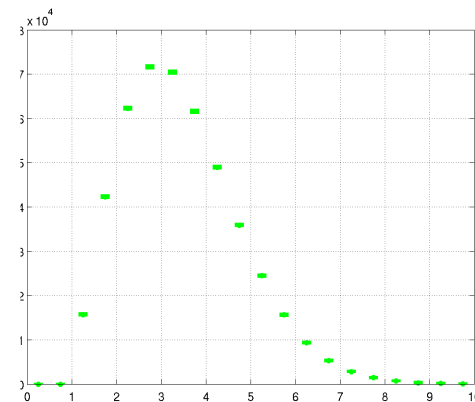
- Oscillations des antineutrinos électroniques  $\rightarrow \theta_{13}$ 
  - > Déficit entre détecteurs lointain et proche ( $R_{\text{lointain/proche}} \neq 1$ )



Détecteur  
proche

Spectres  
antineutrinos  
(MeV)

Simulations MC  
pour  $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,12$

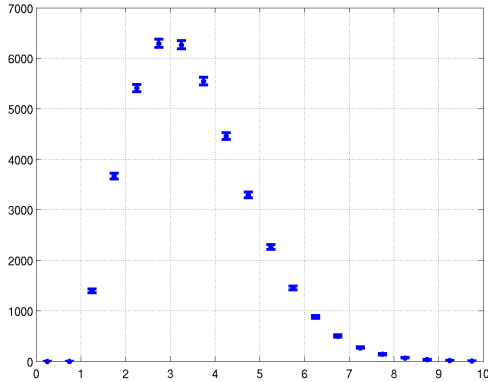


Détecteur  
lointain



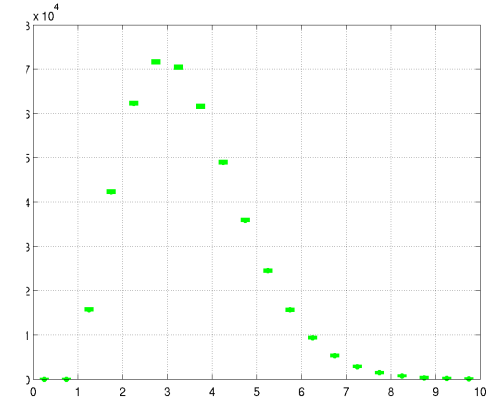
- Oscillations des antineutrinos électroniques  $\rightarrow \theta_{13}$

> Déficit entre détecteurs lointain et proche ( $R_{\text{lointain/proche}} \neq 1$ )



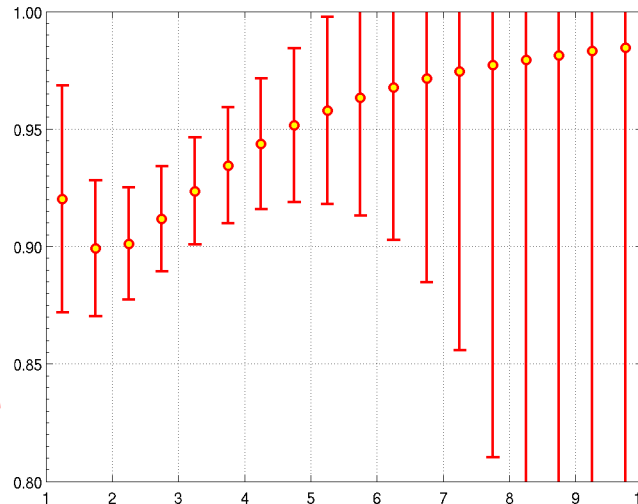
Spectres  
antineutrinos  
(MeV)

Simulations MC  
pour  $\sin^2(2\theta_{13}) = 0,12$



Détecteur  
proche

Rapport  
lointain/proche



Détecteur  
lointain

Evis (MeV)



energie atomique • énergies alternatives



# Le détecteur de Double Chooz

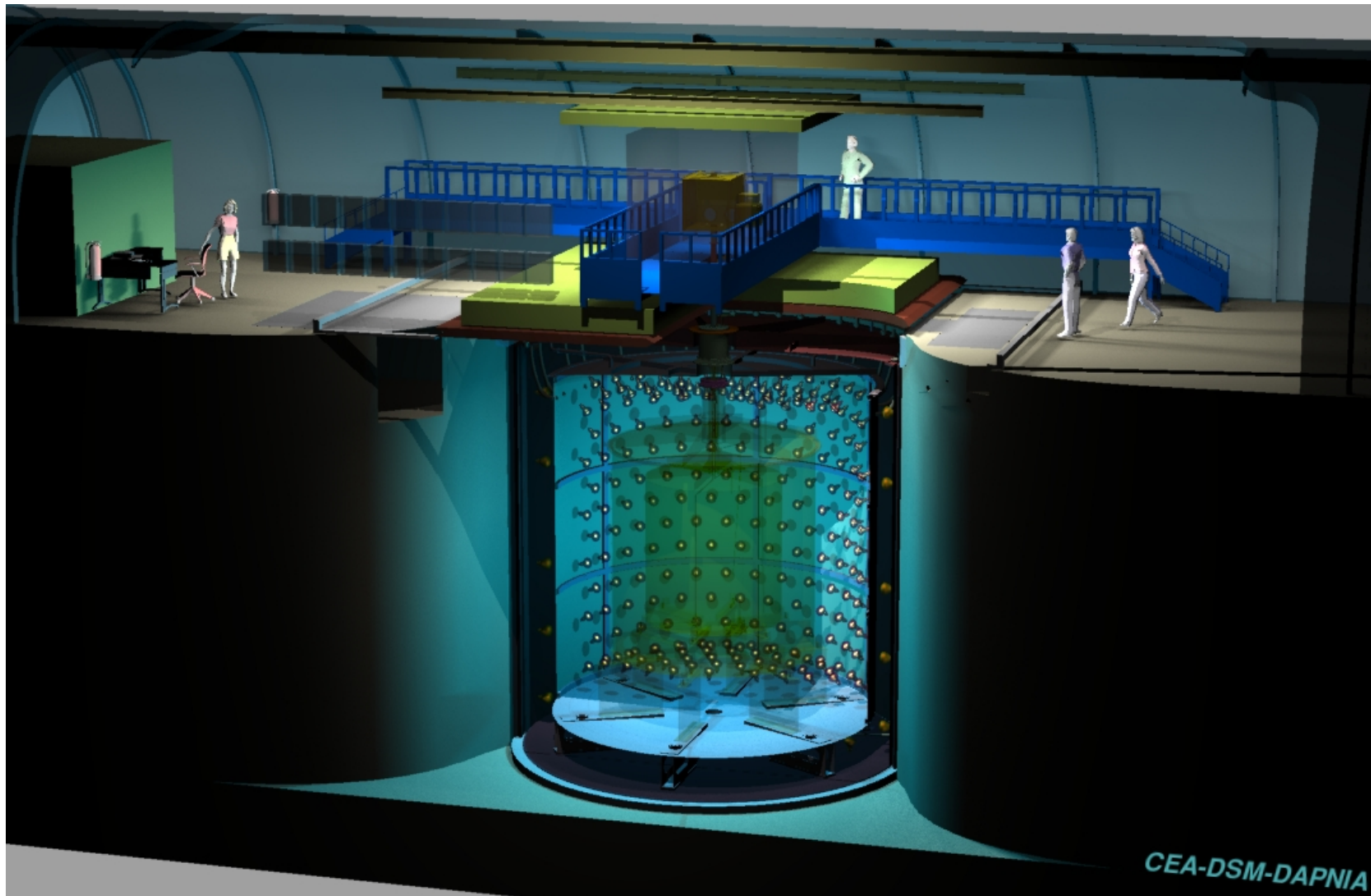


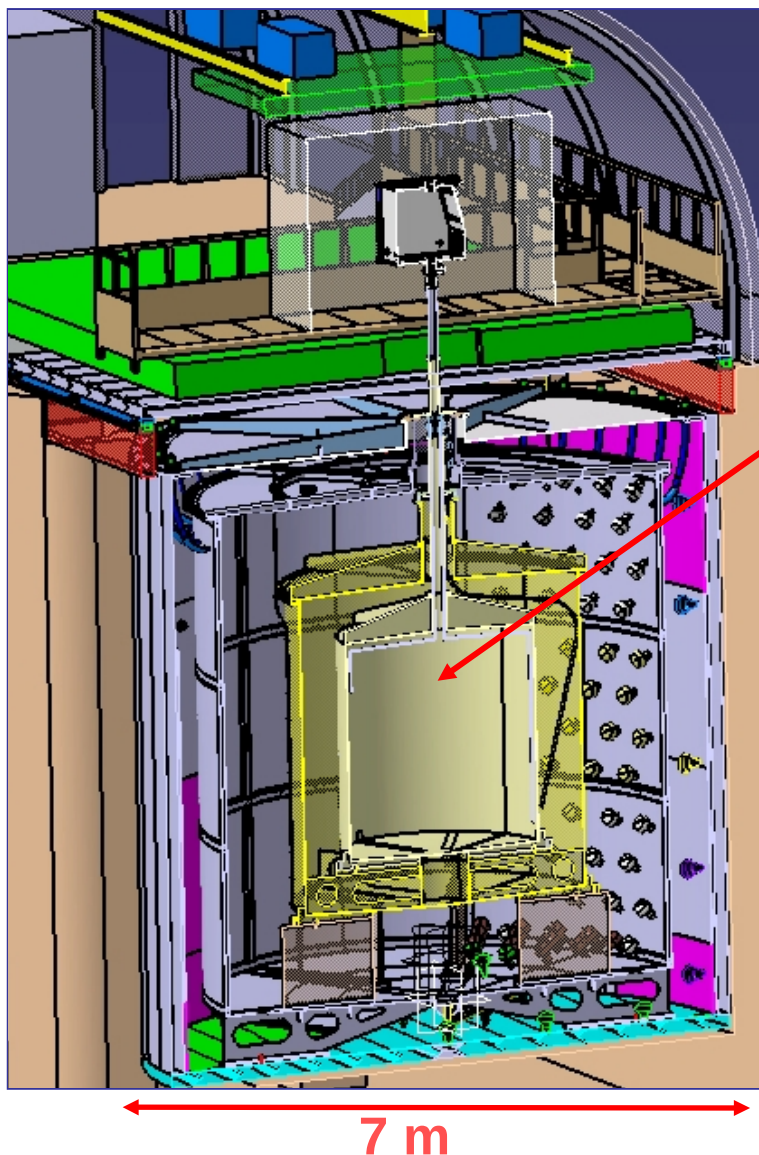
- Désintégration  $\beta$  inverse dans un liquide scintillant :  
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$
- **Photons de scintillation** vus par des photomultiplicateurs (PM)
- Principe utilisé pour la première détection de neutrino !  
(Cowan et Reines, 1956)
- Composition du liquide scintillant :
  - > ~20 % de PXE + ~80 % de dodécane, cible pour les neutrinos
  - > 0,1 % de Gadolinium dissous, capture du neutron à "haute" énergie
  - > PPO et Bis-MSB, composés fluorés, décalent l'énergie des photons de scintillation vers de plus hautes longueurs d'onde (PM plus sensibles) – Processus très rapide (~ ns)

# Le détecteur Double Chooz



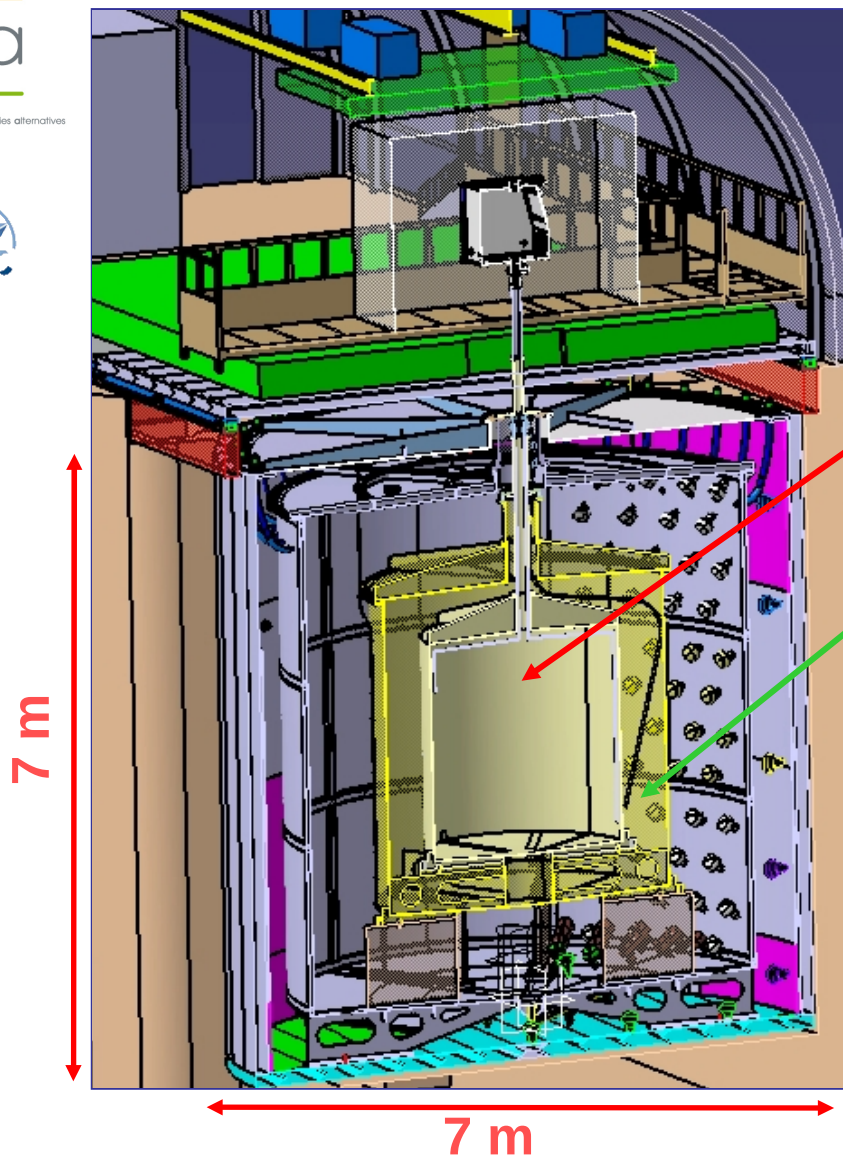
energie atomique • énergies alternatives





Interaction des neutrinos  
dans la zone cible

**Cible à  $\nu$**  : 10,3 m<sup>3</sup> de liquide scintillant dopé à 0,1 % en Gd, dans une enceinte acrylique de 8 mm d'épaisseur

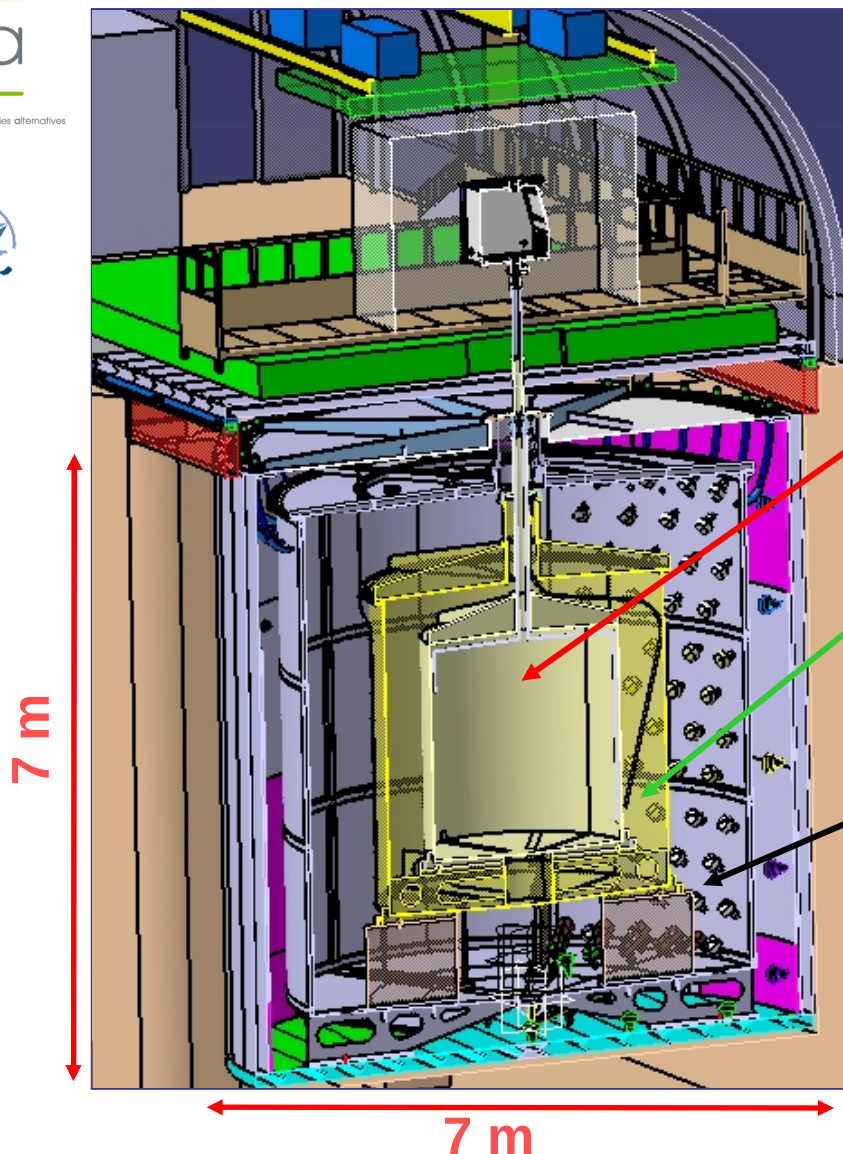


Gamma-catcher :  
calorimètre à positrons

**Cible à  $\nu$**  : 10,3 m<sup>3</sup> de liquide scintillant dopé à 0,1 % en Gd, dans une enceinte acrylique de 8 mm d'épaisseur

**Gamma-catcher** : 22,3 m<sup>3</sup> de liquide scintillant dans une enceinte acrylique d'épaisseur 1 cm



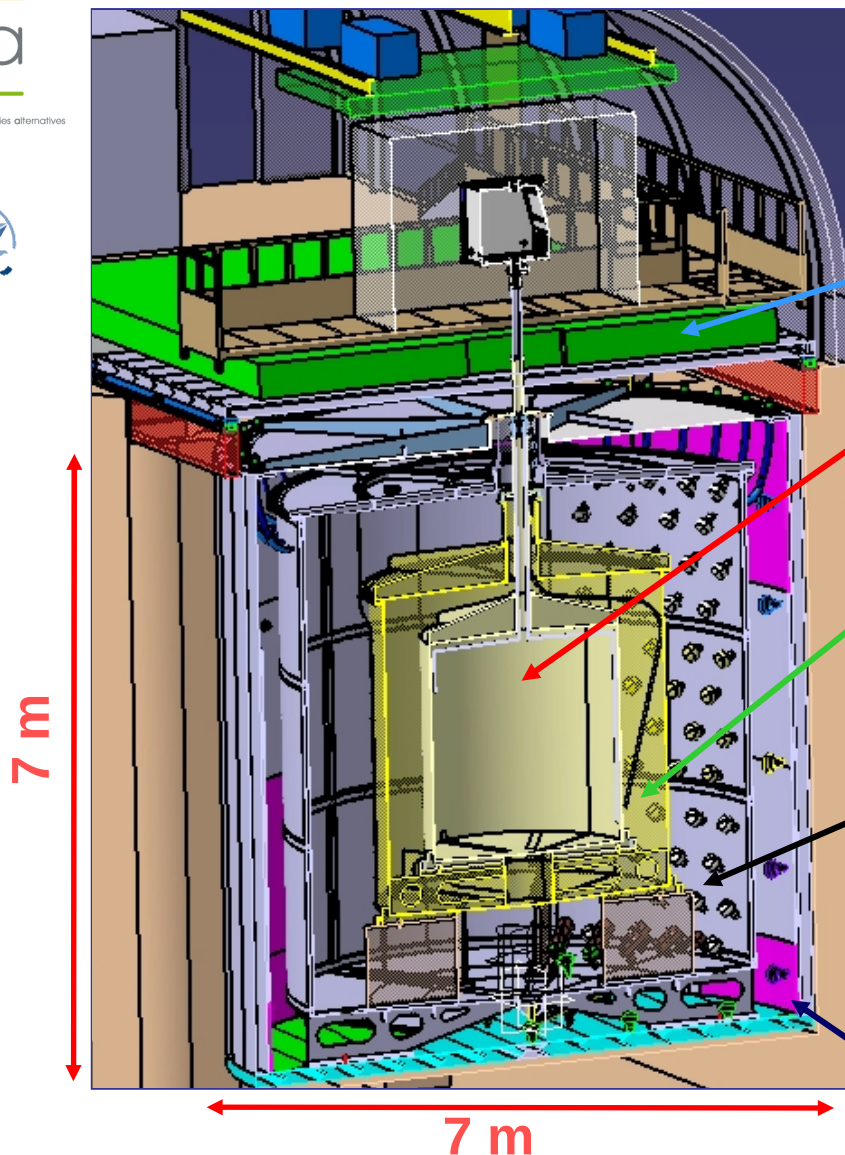


Zone tampon : détection des gammas et protection contre la radioactivité due aux photomultiplicateurs

**Cible à ν** : 10,3 m<sup>3</sup> de liquide scintillant dopé à 0,1 % en Gd, dans une enceinte acrylique de 8 mm d'épaisseur

**Gamma-catcher** : 22,3 m<sup>3</sup> de liquide scintillant dans une enceinte acrylique d'épaisseur 1 cm

**Buffer** : 110 m<sup>3</sup> d'huile minérale dans une enceinte en acier inoxydable, vue par 390 photomultiplicateurs



Protection contre les bruits de fond extérieurs

**Outer Veto** : ensemble de plaques de plastique scintillant

**Cible à v** : 10,3 m<sup>3</sup> de liquide scintillant dopé à 0,1 % en Gd, dans une enceinte acrylique de 8 mm d'épaisseur

**Gamma-catcher** : 22,3 m<sup>3</sup> de liquide scintillant dans une enceinte acrylique d'épaisseur 1 cm

**Buffer** : 110 m<sup>3</sup> d'huile minérale dans une enceinte en acier inoxydable, vus par 390 photomultiplicateurs

**Inner Veto + blindage acier** : 90 m<sup>3</sup> de liquide scintillant, vus par 80 PM

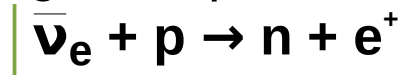


energie atomique • énergies alternatives

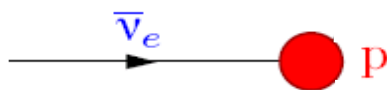


# Méthode de détection – signal et bruits de fond

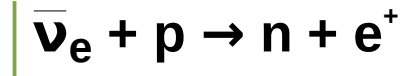
- Désintégration  $\beta$  inverse dans un liquide scintillant :



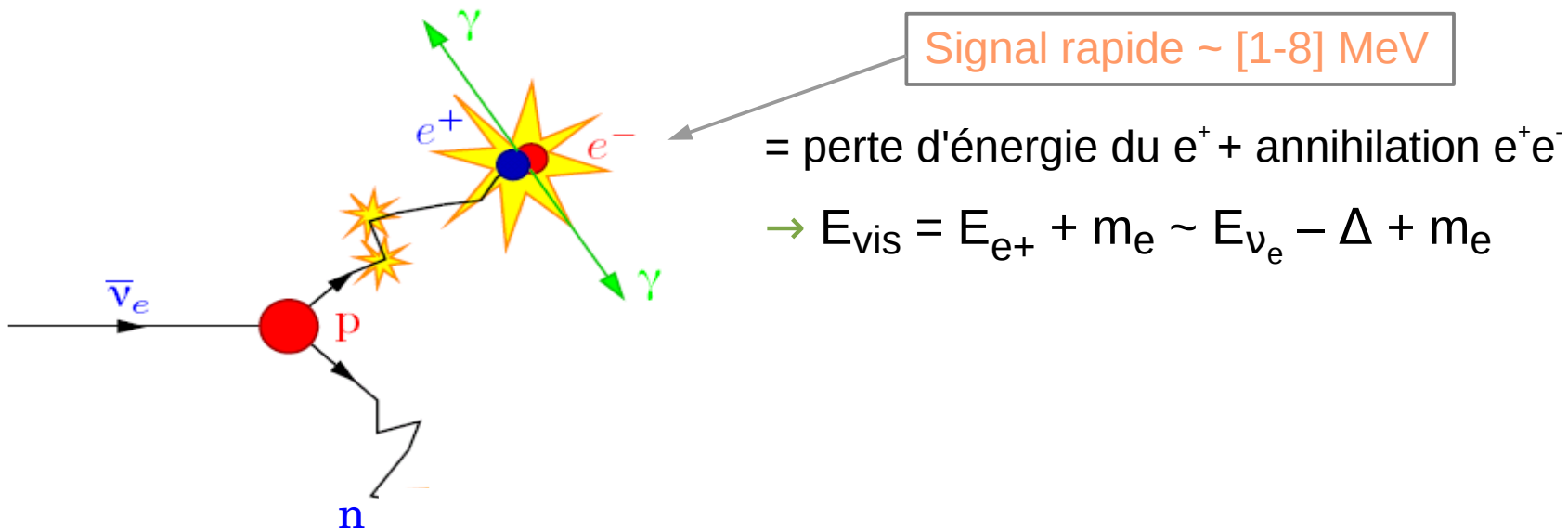
- Photons de scintillation vus par des photomultiplicateurs (PM)



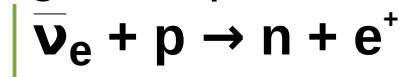
- Désintégration  $\beta$  inverse dans un liquide scintillant :



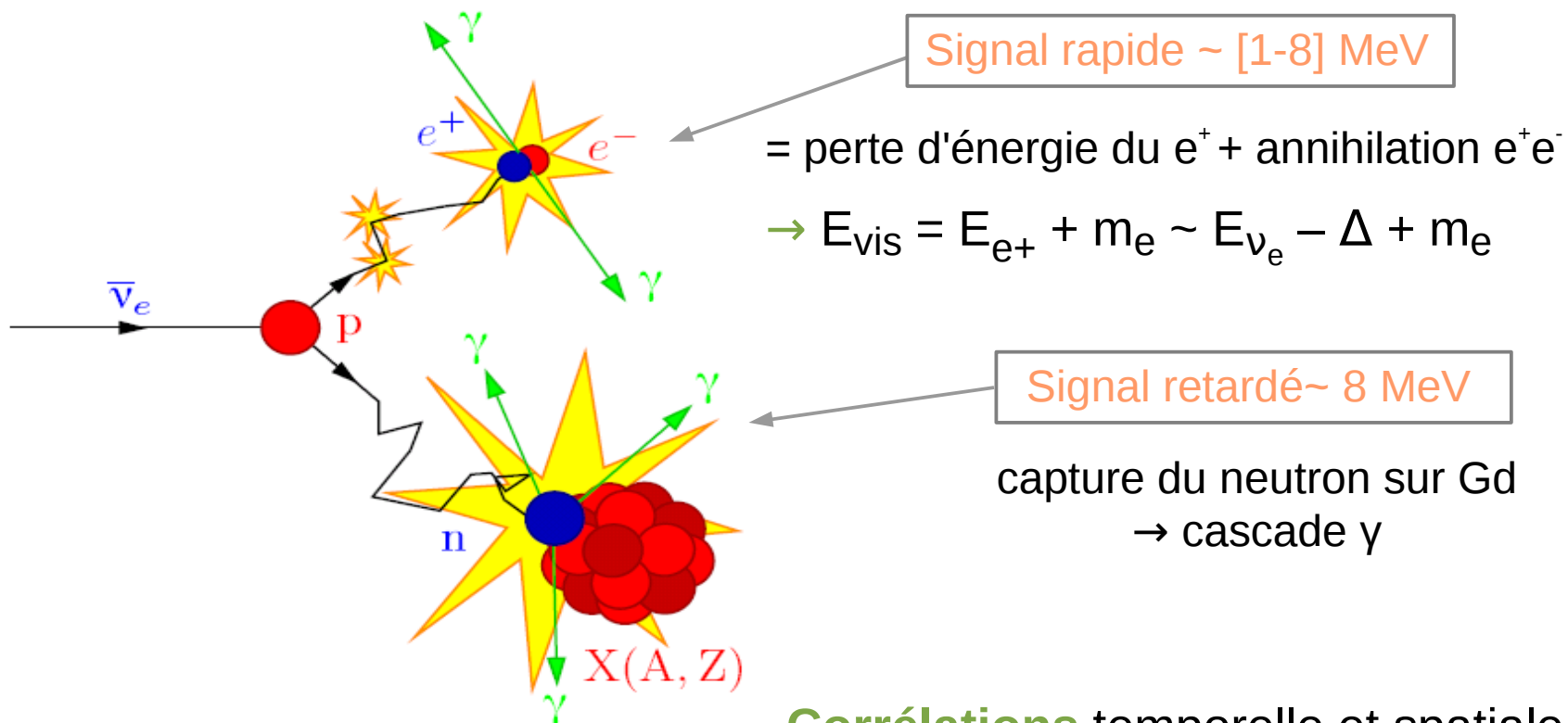
- Photons de scintillation vus par des photomultiplicateurs (PM)



- Désintégration  $\beta$  inverse dans un liquide scintillant :



- Photons de scintillation vus par des photomultiplicateurs (PM)



**Corrélations** temporelle et spatiale  
 $\Delta t \sim 30 \mu\text{s}$  et  $\Delta x < 1 \text{ m}$



- Deux types de bruits de fond : accidentel et corrélé
- **Accidentel** – coïncidences entre :
  - > *Signal type-rapide* =  $\gamma$  de radioactivité (matériaux du détecteur, photomultiplicateurs, roche environnante)
  - > *Signal type-retardé* =  $\gamma$  de radioactivité passant les coupures en énergies ou neutron provenant de muons cosmiques (spallation) capturé sur Gd



- Deux types de bruits de fond : accidentel et corrélé
- **Accidentel** – coïncidences entre :
  - > *Signal type-rapide* =  $\gamma$  de radioactivité (matériaux du détecteur, photomultiplicateurs, roche environnante)
  - > *Signal type-retardé* =  $\gamma$  de radioactivité passant les coupures en énergies ou neutron provenant de muons cosmiques (spallation) capturé sur Gd
- **Corrélé** :
  - > Neutron rapide provenant de  $\mu$  cosmiques perdant leur énergie par collisions sur protons (*type-rapide*) et étant ensuite capturé sur Gd (*type-retardé*)
  - > Désintégrations  $\beta$ -n d'isotopes à longue durée de vie ( $\gg 30\mu\text{s}$ ), comme  ${}^9\text{Li}$  ou  ${}^8\text{He}$  créés par  $\mu$  cosmiques. Vêto impossible.





# Reconstruction des événements

## Calibration du détecteur de Double Chooz

(mon travail, pour l'instant !)



energie atomique • energies alternatives



- **Analyse** des données et **extraction** d'un **signal neutrino**  
→ nécessite une reconstruction de l'événement
- Reconstructions : position du **vertex** + **énergie** visible



- **Analyse** des données et **extraction** d'un **signal neutrino**  
→ nécessite une reconstruction de l'événement
- Reconstructions : position du **vertex + énergie** visible
- Informations disponibles :
  - > Charge observée par les PM  
(photo-électrons (PE), prop. au nombre de photons de scintillation)
  - > Temps d'impact
- Outils disponibles :
  - > Modélisation de l'ensemble du détecteur Double Chooz  
(optique, liquide, géométrie)
  - > Simulations MC
  - > Modèles physiques théoriques  
(processus de scintillation, effet Cerenkov, saturation, etc.)



energie atomique • énergies alternatives



- Développement d'un outil de reconstruction vertex + énergie
  - > basé sur **comparaison** nombre de charges (photo-électrons)  
observé  $N_{\text{obs}}$  (*données*) et attendu  $N_{\text{att}}$  (*modèle*)



- Développement d'un outil de reconstruction vertex + énergie
  - > basé sur **comparaison** nombre de charges (photo-électrons) **observé**  $N_{obs}$  (*données*) et **attendu**  $N_{att}$  (*modèle*)
- **Modèle physique** = proportionnalité entre  $N_{att}$  et  $E_{vis}$ ,  
donc le nombre attendu de photo-électrons pour le PM  $i$  est :

$$N_{att} (PM\ i) = E_{vis} \cdot Y \cdot \epsilon_i$$

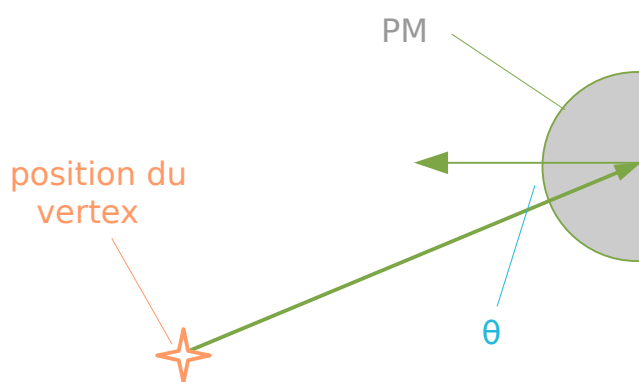
Nb attendu de photo-électron pour le PM  $i$  (*photo-électron*)      Énergie visible (*MeV*)      Rendement de scintillation (*photon/MeV*)      Efficacité quantique du PM  $i$  (*photo-électron/photon*)

- Développement d'un outil de reconstruction vertex + énergie
  - > basé sur **comparaison** nombre de charges (photo-électrons) **observé**  $N_{obs}$  (*données*) et **attendu**  $N_{att}$  (*modèle*)
- **Modèle physique** = proportionnalité entre  $N_{att}$  et  $E_{vis}$ , donc le nombre attendu de photo-électrons pour le PM  $i$  est :

$$N_{att} (PM\ i) = E_{vis} \cdot Y \cdot \epsilon_i \cdot G_i + f(E_{vis})$$

Corrections géométriques :  
atténuation + angle solide du PM  $i$

Composante due  
aux radiations Cerenkov  
(photo-électrons)





energie atomique - energies alternatives



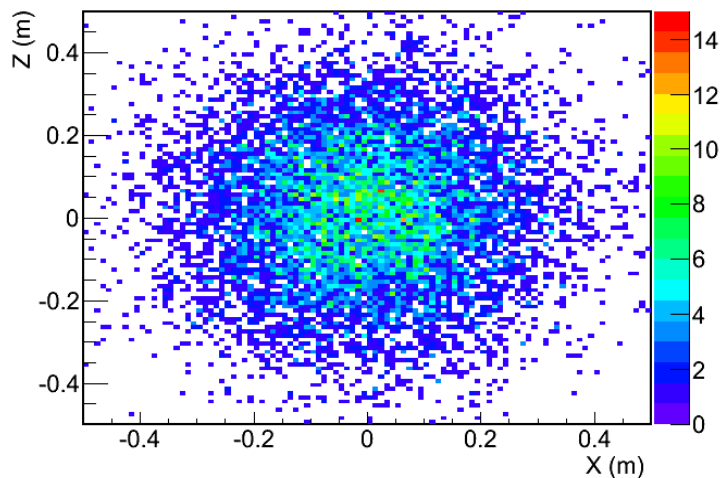
- Technique de fit classique : **fonction de vraisemblance** ajustée avec Minuit pour trouver  $E_{vis}$  et la position du vertex

$$-2\log L = 2 \sum [ N_{att(i)} - N_{obs(i)} + N_{obs(i)} \log(N_{obs(i)}/N_{att(i)}) ]$$

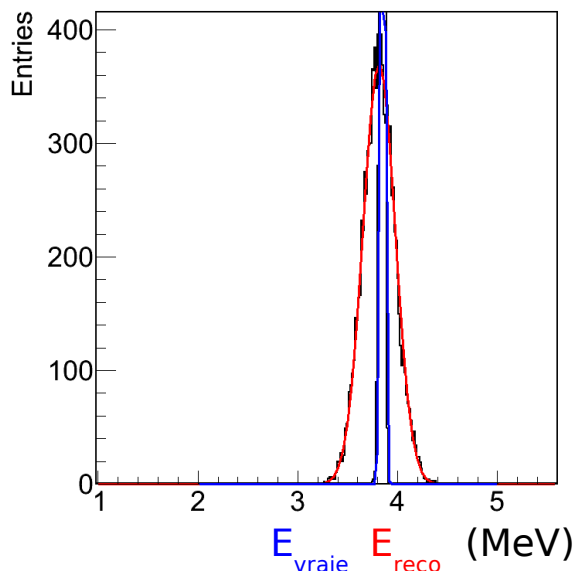
*somme sur i, entre 1 et le nombre de PM*

- Exemple de résultats :

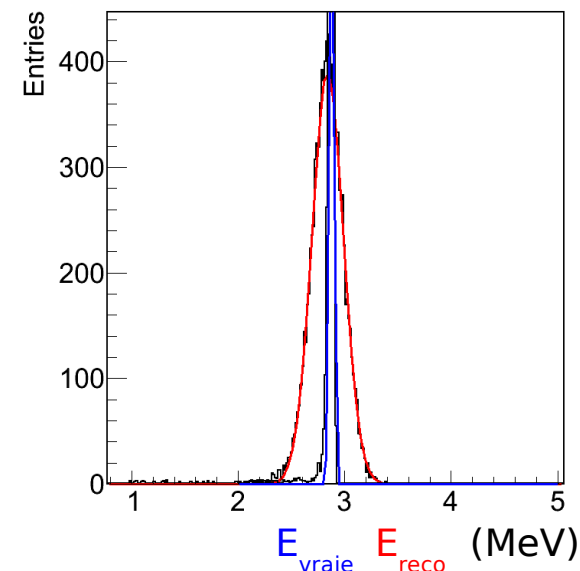
Reconstruction vertex électrons



Distribution énergies positrons



Distribution énergies gammas





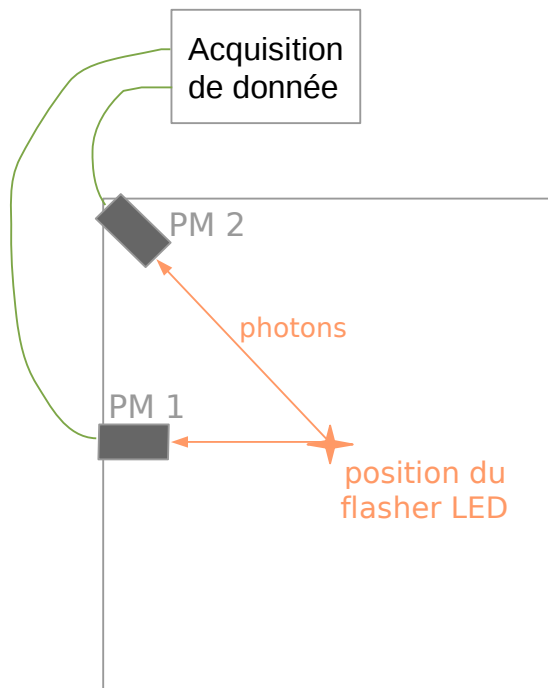
energie atomique • energies alternatives



- Pour l'instant : un détecteur prêt (en cours de remplissage)
- Phase de pre-commissioning/commissioning/**calibration**
  - > Utilisation (notamment) de données d'un flasher LED au centre du détecteur pour calibration des **décalages en temps des PM** (dûs aux câbles, système d'acquisition, etc.)



- Pour l'instant : un détecteur prêt (en cours de remplissage)
- Phase de pre-commissioning/commissioning/**calibration**
  - > Utilisation (notamment) de données d'un **flasher LED** au centre du détecteur pour calibration des **décalages en temps des PM** (dûs aux câbles, système d'acquisition, etc.)



*Schéma du détecteur*

- Pour l'instant : un détecteur prêt (en cours de remplissage)
- Phase de pre-commissioning/commissioning/**calibration**
  - > Utilisation (notamment) de données d'un **flasher LED** au centre du détecteur pour calibration des **décalages en temps des PM** (dûs aux câbles, système d'acquisition, etc.)

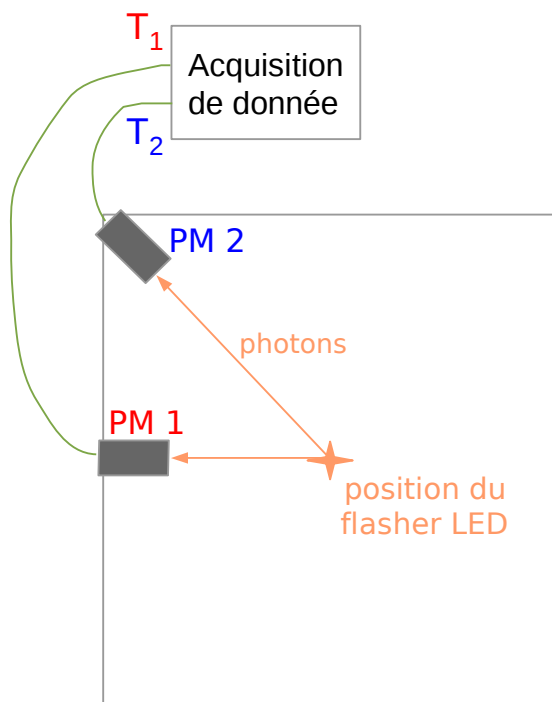
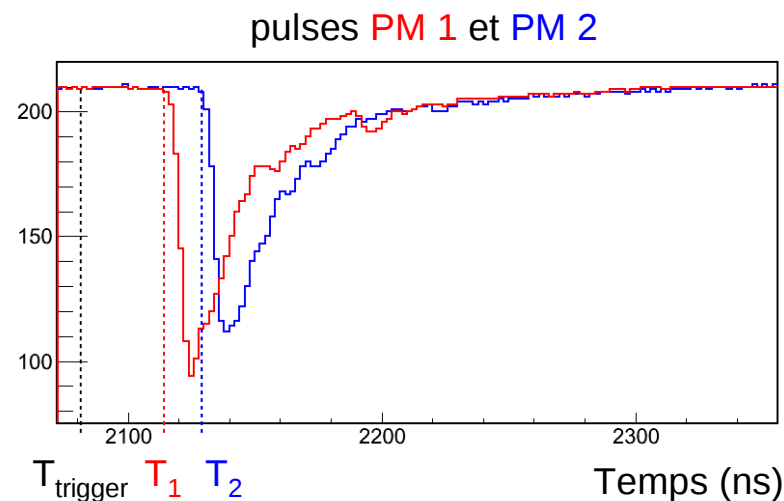


Schéma du détecteur



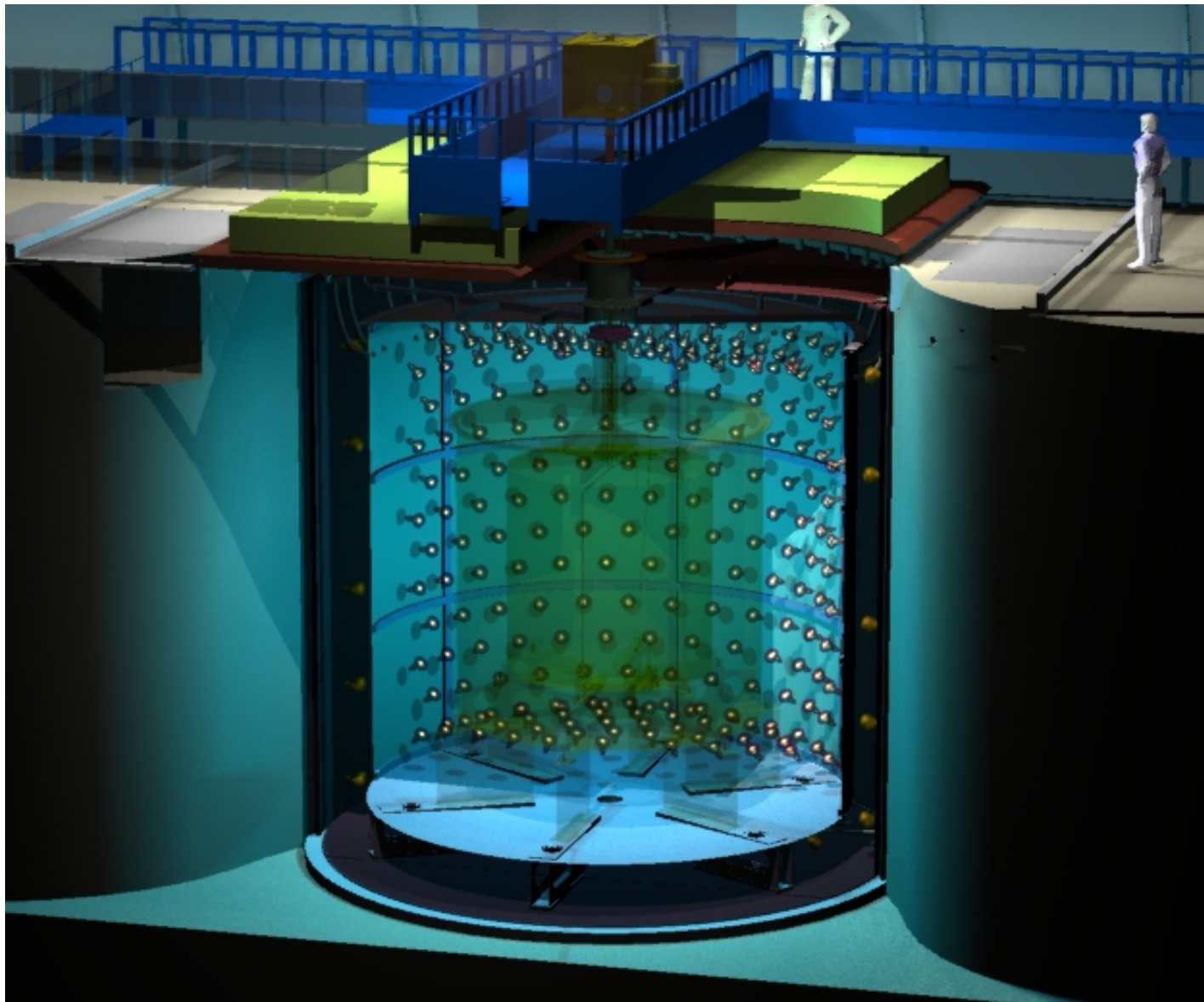
$$\text{Décalage}_{PM i} = T_i - T_{\text{trigger}} - T_{\text{temps de vol pour PM } i}$$

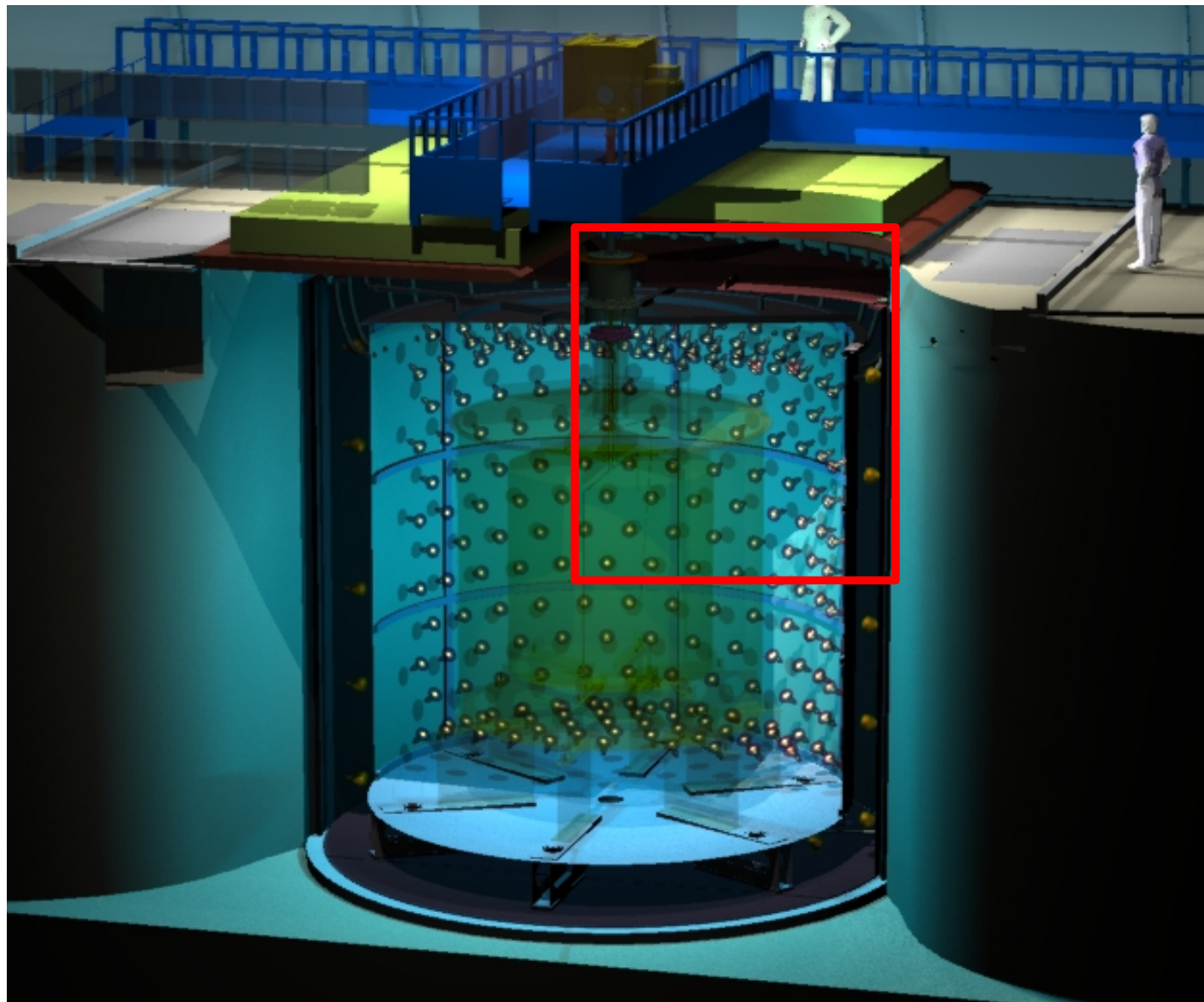


energie atomique • énergies alternatives



- Calibration :
  - gains, piédestaux, single PE, des PM, → **échelle d'énergie**
  - constantes liquide (atténuation, etc.), → réflectivité de l'enceinte Buffer





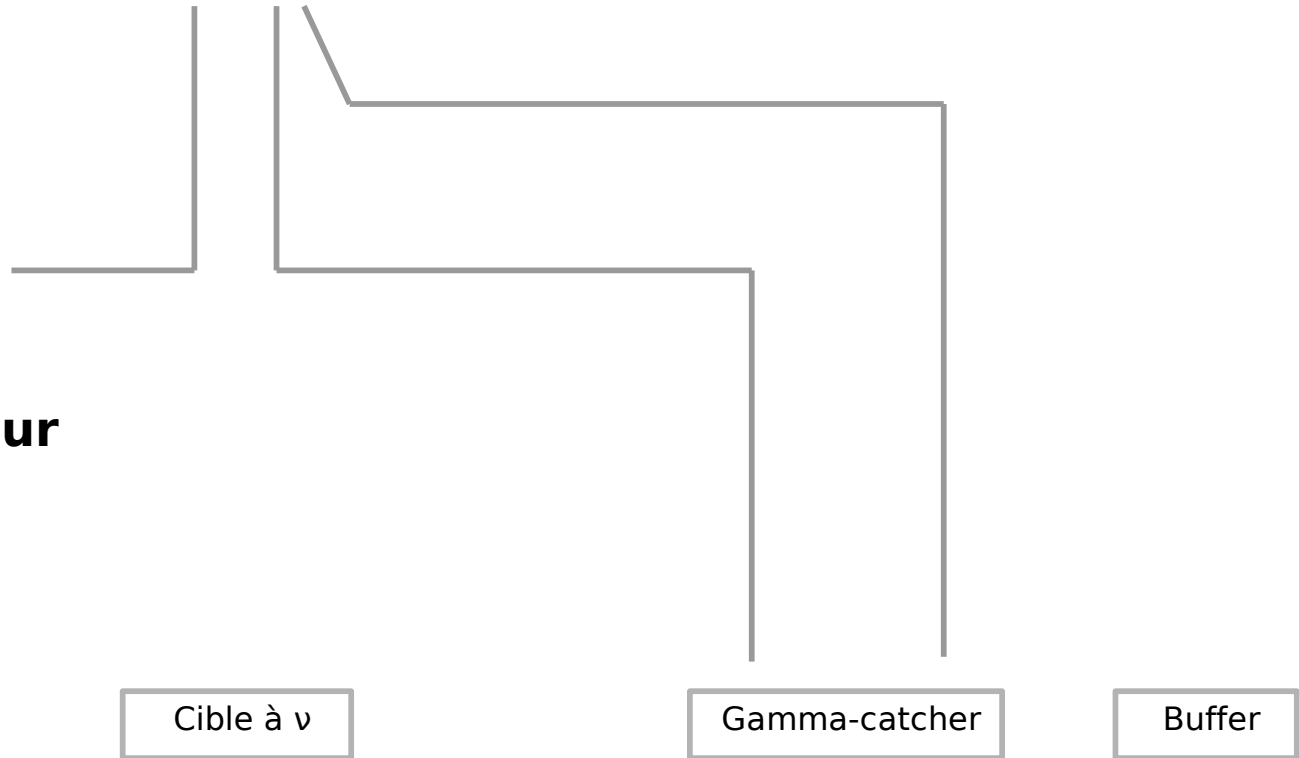


- Calibration :

- gains, piédestaux, single PE, des PM,
- constantes liquide (atténuation, etc.),

- échelle d'énergie
- réflectivité de l'enceinte Buffer

Cheminée



**Schéma :  
coin du détecteur**

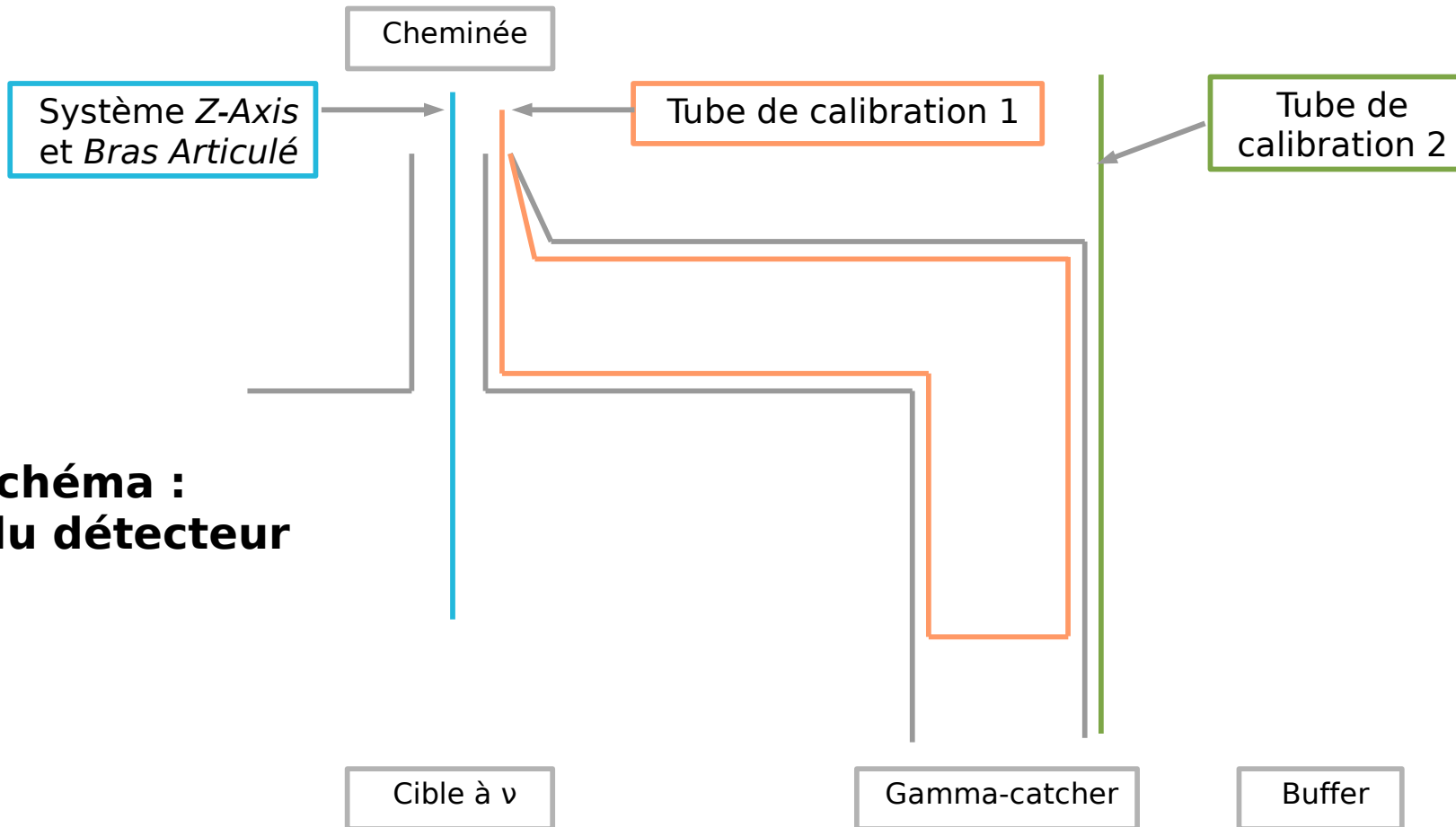


- Calibration :

- gains, piédestaux, single PE, des PM, → échelle d'énergie
- constantes liquide (atténuation, etc.), → réflectivité de l'enceinte Buffer



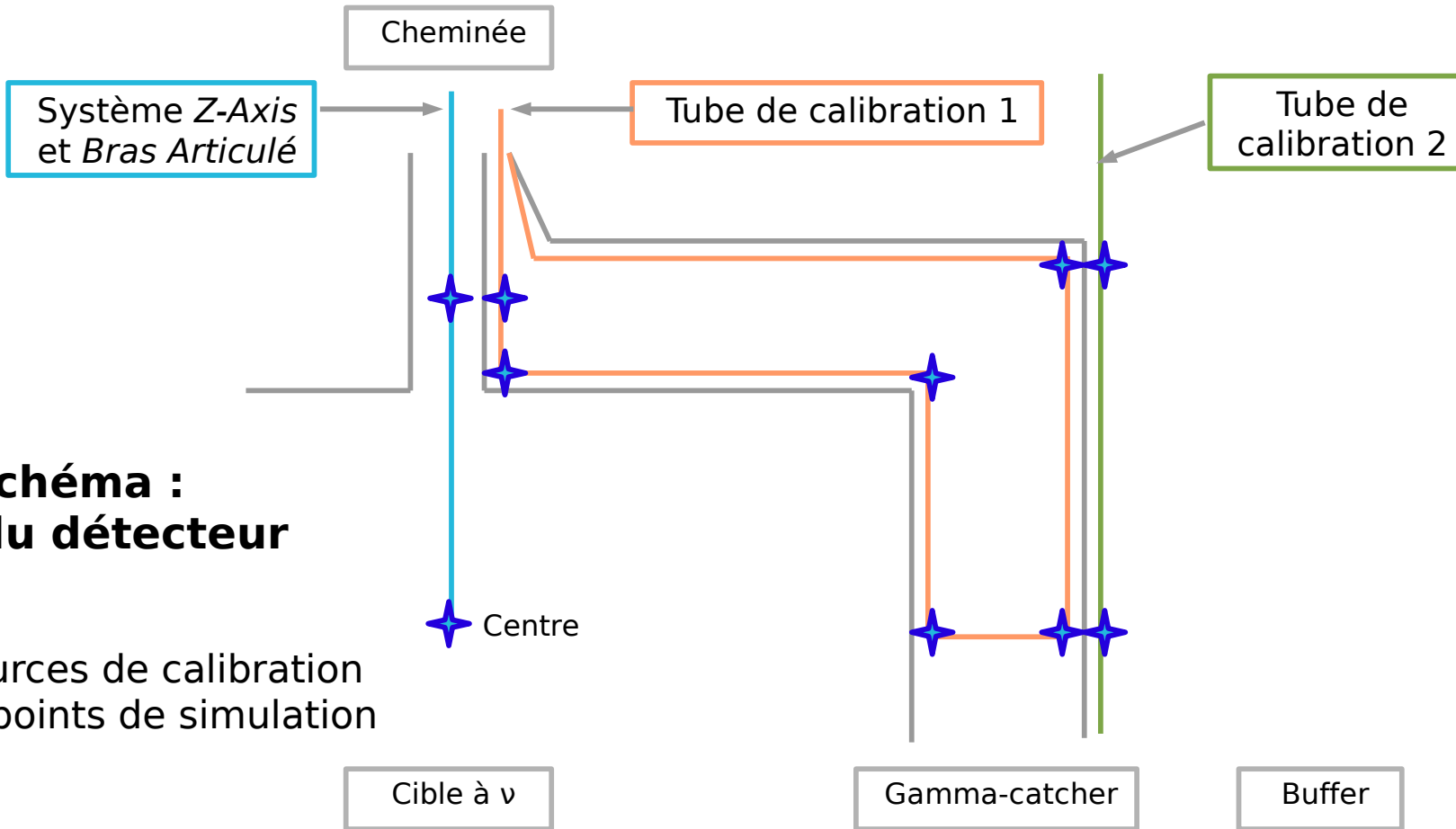
## Schéma : coin du détecteur



- Calibration :

- gains, piédestaux, single PE, des PM,
- constantes liquide (atténuation, etc.),

- échelle d'énergie
- réflectivité de l'enceinte Buffer



## Schéma : coin du détecteur

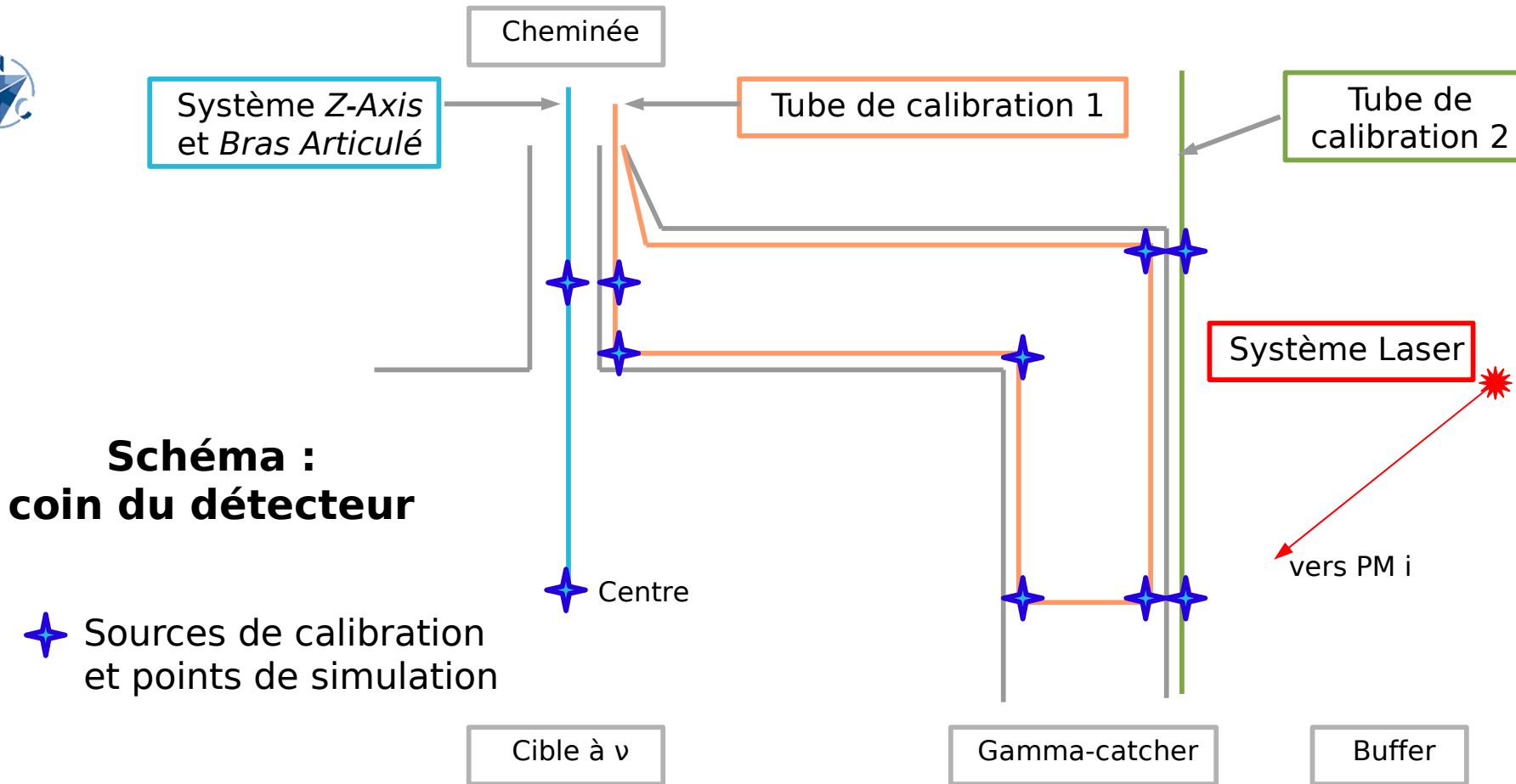
★ Sources de calibration  
et points de simulation



- Calibration :

- gains, piédestaux, single PE, des PM,
- constantes liquide (atténuation, etc.),

- échelle d'énergie
- réflectivité de l'enceinte Buffer





energie atomique • énergies alternatives



# Potentiel de découverte et sensibilité



energie atomique • énergies alternatives



- Flux  $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e$  par seconde  $\sim 2 \bar{\nu}_e$  détectés par heure
  - > Au bout d'un an et demi de prise de données à un détecteur  $\sim 20\,000$  événements  $\bar{\nu}$
- Limite actuelle (de CHOOZ) :  
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0,15$  à 90 % C.L. pour  $\Delta m_{31}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$



energie atomique - energies alternatives



- Flux  $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e$  par seconde  $\sim 2 \bar{\nu}_e$  détectés par heure
  - > Au bout d'un an et demi de prise de données à un détecteur  $\sim 20\,000$  événements  $\bar{\nu}$

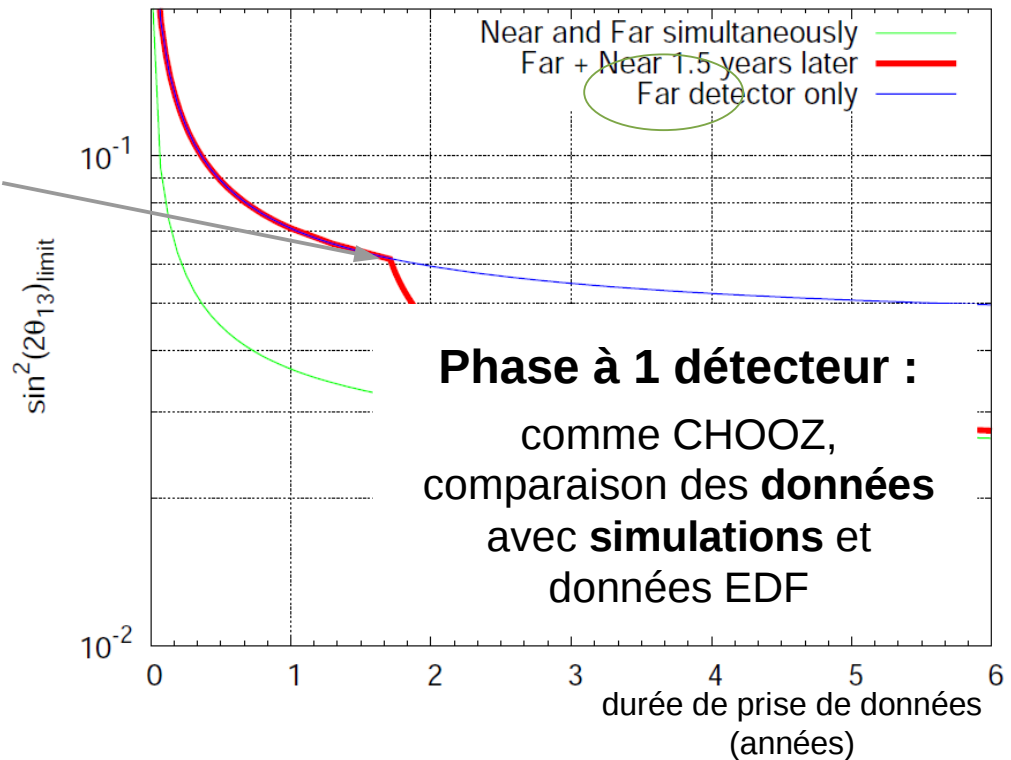
- Limite actuelle (de CHOOZ) :

$$\sin^2(2\theta_{13}) < 0,15 \text{ à } 90\% \text{ C.L. pour } \Delta m_{31}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Si pas d'oscillation...

Au bout d'un an et demi :

$$\sin^2(2\theta_{13}) < 0,06$$





energie atomique - énergies alternatives



- Flux  $\sim 10^{21} \bar{\nu}_e$  par seconde  $\sim 2 \bar{\nu}_e$  détectés par heure
  - > Au bout d'un an et demi de prise de données à un détecteur  $\sim 20\,000$  événements  $\bar{\nu}$

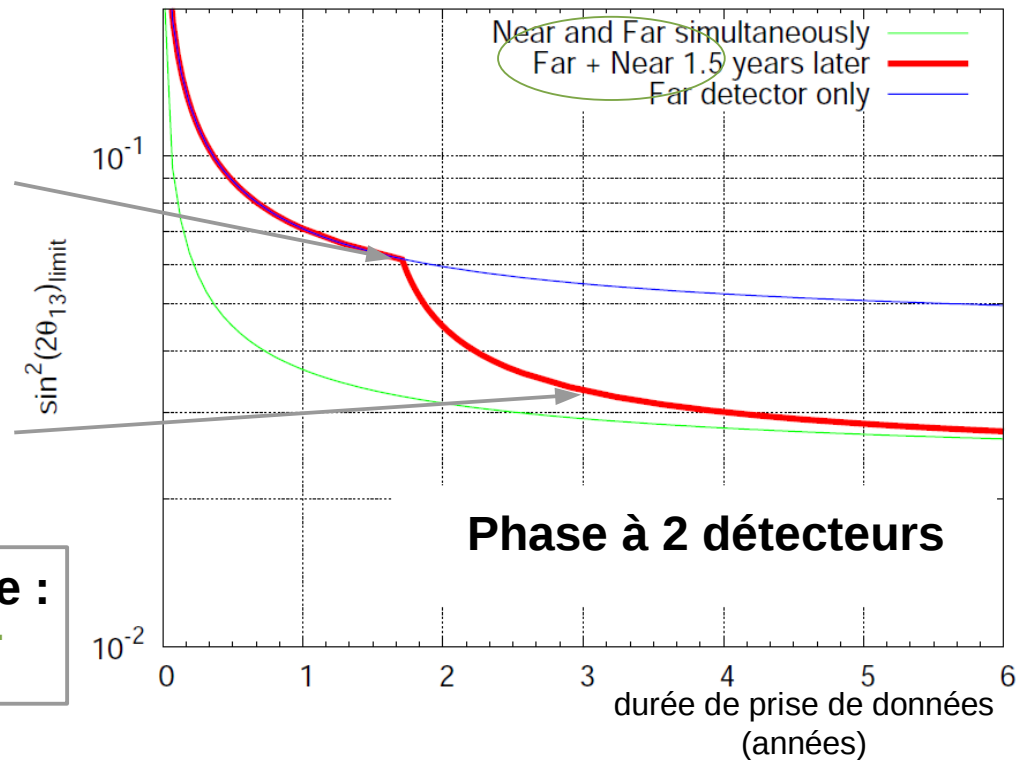
- Limite actuelle (de CHOOZ) :

$$\sin^2(2\theta_{13}) < 0,15 \text{ à } 90\% \text{ C.L. pour } \Delta m_{31}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Si pas d'oscillation...

Au bout d'un an et demi :  
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0,06$

Au bout de trois ans :  
 $\sin^2(2\theta_{13}) < 0,03-0,04$



**Potential de découverte :**

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0,05 \text{ à } 3\sigma$$



energie atomique • energies alternatives



MERCI !