

# OSCILLATIONS de NEUTRINOS

Un panorama à la lumière des résultats de l'expérience T2K

**ARNAUD ROBERT** <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Université Pierre et Marie Curie - LPNHE*

Arnaud.Robert@cern.ch



# Plan

- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer  $\theta_{13}$  sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation
- 4 Conclusion & Perspectives

Il y a bien longtemps, dans une  
galaxie lointaine,  
très lointaine.

# Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- Prélogie: des faits expérimentaux:

[(Pauli, Fermi), Reines & Cowan, Wu et al., Goldhaber et al., Lederman et al.,  
DONUT, LEP ( $Z^0$ ) ...]

Un (anti)neutrino détectable  $\nu(\bar{\nu})$  est un fermion [lepton] électriquement neutre, d'hélicité gauche(droite), et se décline en **3** saveurs actives:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

- et un modèle, le MSE:

\* Un groupe de jauge:  $G_{SM} = SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

\* Un contenu en particules: 5 représentations de  $G_{SM}$

$Q_L(3, 2)_{+1/6}, U_R(3, 1)_{+2/3}, D_R(3, 1)_{-1/3}, L(1, 2)_{-1/2}, E_R(1, 1)_{-1}$   
répliquées chacune en **3** familles (saveurs)

# Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- Pas de  $\nu_R \leftrightarrow$  **pas de masse à l'ordre de l'arbre**
- Idée d'une théorie **renormalisable**

$G_{SM} \subset G_{ren} \leftrightarrow$  Groupe de symétrie global **accidentel**:

$$G' = U(1)_B \times U(1)_{L_e} \times U(1)_{L_\mu} \times U(1)_{L_\tau}$$

$\leftrightarrow$  pas de masse ( $|\Delta L| = 2$ ) perturbative

$U(1)_{B-L}$  sous-groupe de  $G'$  est sans anomalie quantique

$\leftrightarrow$  pas de masse non-perturbative ...

**$m_\nu = 0$  dans le Modèle Standard Electrofaible Minimal**

Cependant ...

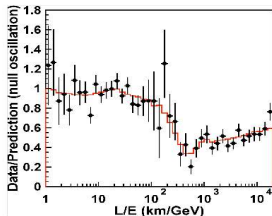


dans le cours de l'histoire ...

# Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- [Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos

The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett. 81 (1998)]



- La saveur  $\nu_\mu$  n'est pas conservée  
 → secteur *atmosphérique*
- Egalement le cas pour la saveur  $\nu_e$   
 → secteur *solaire*

[SNO, SK, Borexino, Chlorine, Gallium  
 + KamLand ( $\bar{\nu}_e$ )]

- Observation dans une vaste gamme d'énergies et de distances

**Oscillations de saveur ↔ Neutrino massif !**  
 mais ordre de grandeur limité: e.g. cosmologie:

$$\Sigma m_\nu < O(0.5) \text{ eV} \quad [\text{Lesgourgues et al. Adv.High.Energy Phys. 608515 (2012)}]$$

## Digression: modèle de masse pour le neutrino

Plus de questions que de réponses ...

fermion neutre & représentation  $(1/2, 0) \oplus (0, 1/2)$  du groupe de Poincaré  $\leftrightarrow$  spineur de Dirac ou de Majorana ( $\nu = \nu^c$ ) ?

Il faut renoncer à certains paradigmes (mais **l'invariance de jauge** reste une **forteresse inexpugnable**)

- Enrichir le contenu en particules ?
- Renoncer à la renormalisabilité ?  $\leftrightarrow$  Théorie effective
- Elargir le degré de symétrie (groupe de jauge ...) ?



## Digression: modèle de masse pour le neutrino

- Enrichir le contenu en particules ?

→  $n_s$  neutrinos *stériles* dans une sixième représentation  
 $N_R(1, 1)_0$  de  $G_{SM}$  + **brisure électrofaible**

$$-\mathcal{L}_m^D = Y_{ij}^\nu \bar{\nu}_{iR} \tilde{\Phi}^\dagger L_{jL} + h.c. \quad \nu = \text{fermion de Dirac avec } n_s = 3$$

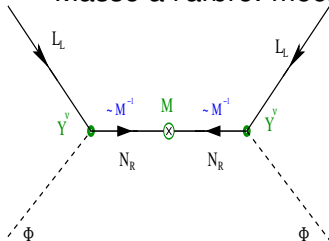
$U(1)_{B-L}$  toujours symétrie globale mais  $Y^\nu / Y^{\text{top}} \sim O(10^{-12})$

$$-\mathcal{L}_m^M = \mathcal{L}_m^D + \frac{1}{2} M_{ij} \bar{N}_{iR} N_{jR}^c + h.c. \quad \nu = \text{fermion de Majorana}$$

$U(1)_{B-L}$  est brisée.  $n_s \geq 3$ .  $M$  n'est protégé par aucune symétrie

# Digression: modèle de masse pour le neutrino

Masse à l'arbre: mécanisme de bascule "See-Saw"



\* **Brisure électrofaible**  $\langle \Phi \rangle \neq 0$

\*  $M \gg Y^\nu \langle \Phi \rangle$

$$m_\nu \simeq -Y^\nu T \mathbf{M}^{-1} Y^\nu \langle \Phi \rangle^2$$

↔ plusieurs modèles/types sur le marché ... (étendre le secteur scalaire ?)

- Renoncer à la renormalisabilité ?  $-\mathcal{L}_{d=5}^M = C_{ij} \frac{(\bar{L}_{iL}^c \tilde{\Phi}^*)(\tilde{\Phi}^\dagger L_{jL})}{\Lambda_{NP}}$
- SUSY ? (hiérarchie & scalaire :-)) ( $R_P$  ?)
- $U(1)_{B-L}$  jaugée ? - Introduire  $G \supset G_{SM} \dots SO(10) \dots$

# Neutrinos massifs & physique des (3) saveurs

- Symétrie *globale* de saveur du lagrangien non-massif  
e.g. MSE minimal :  $G^{\mathcal{M}} = [U(3)]^5$
- Brisure par les termes de masse  
e.g.  $\nu$  Dirac:  $[U(3)]^5 \rightarrow U(1)_B \times U(1)_L$

$\leftrightarrow$  Paramètres inabsorbables par les éléments de  $G^{\mathcal{M}}$ , secteur des leptons:

Dirac



9 modules dont **6** masses  
**+1 phase** (violant CP)

Majorana (Découplage/Théorie effective)



9 modules dont **6** masses  
**+3 phases** (violant CP)

# Mélange des saveurs

- Couplages de masse (bi)diagonalisés:

$$\mathcal{L}_{cc} \sim \frac{g}{\sqrt{2}} \gamma^\mu W_\mu^- (\bar{l}_L K_l^\dagger) (K_\nu \nu_L) + h.c. \sim \frac{g}{\sqrt{2}} \gamma^\mu W_\mu^- \bar{l}_L U \nu_L + h.c.$$

- $U$  matrice (unitaire ?) de

*Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata*:  $\nu_{L,\alpha} = \sum_{i=[1,3]} U_{\alpha i} \nu_{L,i}$

[Maki, Z.; Nakagawa, M.; Sakata, S. Progress of Theoretical Physics, Vol.28,

No.5, (1962)]

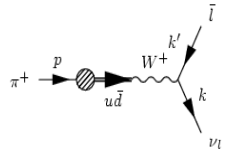
- Paramétrisation standard avec 3 angles de mélange  
 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  et 1+2 phases de *violation de CP*

$$U_{[\alpha i]} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{i\eta_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\eta_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

# Un peu de mécanique quantique

- Le mélange des *champs*:  $\nu_{L,\alpha} = \sum_{i=[1,3]} U_{\alpha i} \nu_{L,i}$

engendre a priori des états *intriqués*:



$$|l_{\alpha} \nu_{L,\alpha}\rangle \propto \sum_{i=[1,3]} \int \frac{d^3 \vec{k}'_i d^3 \vec{k}_i}{(2\pi)^6 2E_{k'_i} 2E_{k_i}} (2\pi)^4 \delta^4(p - k'_i - k_i) U_{\alpha i}^* |l(k'_i) \nu_{L,i}(k_i)\rangle$$

Hyp: état  $|\pi^+\rangle$  bien déterminé  $\rightarrow$  oscillation de saveur **impossible** ... (matrice densité  $\hat{\rho}_{\{\nu\}}$  diagonale) ...

- Avec *désintrication* (rapide) du lepton associé  $\rightarrow$

$$|\nu_{L,\alpha}\rangle_{[T,X]} \propto \sum_{i=[1,3],\xi} \int \frac{d^3 \vec{k}_i}{(2\pi)^3 2E_{k_i}} \mathcal{F}_{\xi}(X, \vec{k}_i) U_{\alpha i}^* \hat{b}_{i,\xi}^{\dagger}(\vec{k}_i, T) |0\rangle$$

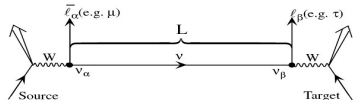
$\mathcal{F}_{\xi}(X, \vec{k}_i)$ : localisation du paquet d'onde dans l'espace(-temps)  $\leftrightarrow [\sigma_X]$

## Encore un peu de mécanique quantique

- Probabilité  $\mathcal{P}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_{L,\beta} | \nu_{L,\alpha} \rangle|_{[T_d, X_d] [T_p, X_p]}|^2$
- On mesure  $\overline{\mathcal{P}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)} \equiv P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, L = X_d - X_p) \quad (E_i \gg m_i)$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, L, E) \simeq \sum_{i,j} U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp \left[ -2\pi i \frac{L}{L_{ij}^{\text{osc}}} \right] \\ \times \left( \exp \left[ - \left( \frac{L}{L_{ij}^{\text{coh}}} \right)^2 - \left( \frac{\bar{\sigma}_X}{L_{ij}^{\text{osc}}} \right)^2 \right] \right)$$

- \* Longueur d'oscillation:  $L_{ij}^{\text{osc}} = \frac{4\pi E}{\Delta m_{ij}^2}$
- \* Longueur de cohérence:  $L_{ij}^{\text{coh}} = \frac{4\sqrt{2}E^2}{|\Delta m_{ij}^2|} \sigma_X$



- $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, L, E)$  est insensible aux phases de Majorana  $\eta_i$

# Violation de CP - Implications & conséquences

- Quantification “universelle” de la violation de symétrie CP ?
- e.g. secteur leptonique -  $\nu$  Dirac:

$$\det([Y^\nu Y^{\nu\dagger}, Y^l Y^{l\dagger}]) = -2i J_{CP}^{PMNS} \prod_{\nu,l} \Delta m_l^2 \Delta m_\nu^2$$

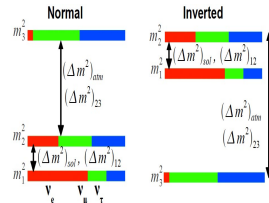
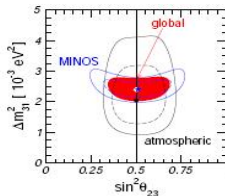
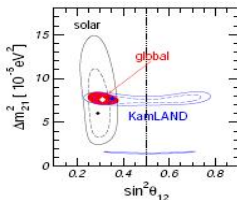
$$J_{CP}^{PMNS} = \text{Im}(U_{\mu 3} U_{e 3}^* U_{e 2} U_{\mu 2}^*) = s_{12} s_{23} s_{13} c_{12} c_{23} c_{13}^2 \sin \delta$$

- $J_{CP}^{CKM} = O(10^{-5})$  est insuffisant pour une baryogenèse électrofaible “Standard”
- Neutrinos massifs  $\rightarrow \mathcal{CP} \equiv$  condition de Sakharov (Leptogenèse  $\rightarrow$  Baryogenèse ?)

la réponse à la question  $\theta_{13} \neq 0$  ? est cruciale  
(tout comme la valeur de  $\delta$ )

# Oscillations de neutrinos - Etat de l'art pré-2012

- Secteur solaire:  $\sin^2(2\theta_{12}) = 0.87 \pm 0.03$   $\Delta m_{12}^2 = 7.59 \pm 0.20 \times 10^{-5} \text{eV}^2$   
[SNO, KamLand, SK]
- Secteur atmosphérique:  
 $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.92$  (90%C.L.)  $|\Delta m_{31}^2| = 2.43 \pm 0.13 \times 10^{-3} \text{eV}^2$   
[SK, K2K, MINOS,  $\rightarrow$  T2K]
- $\sin^2(2\theta_{13})$  ? [MINOS,  $\rightarrow$  T2K, DAYA-BAY, RENO, (DOUBLE)CHOOZ]
- Hiérarchie (une autre ...) de masse ?  $\delta$  ?

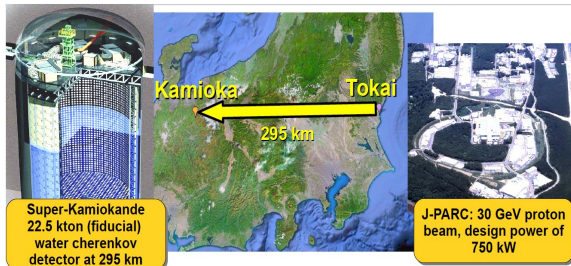




# Plan

- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer  $\theta_{13}$  sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation
- 4 Conclusion & Perspectives

# T2K: Tokai to Kamioka



## Buts fondateurs de l'expérience:

- Mise en évidence et mesure d'apparition de la saveur  
 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$
- Mesures de précisions dans le secteur atmosphérique  
 $\leftrightarrow$  Disparition de saveur  $\nu_{\mu}$

## T2K: mesurer $\theta_{13}$ via $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

- Oscillation à **3** saveurs  $\otimes$  effets de matière
- Développement en  $\alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2} \ll 1$

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, L, E) &\simeq \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \frac{\sin^2([1-A]\Phi)}{[1-A]^2} \\
 &+ \alpha \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin^2 \theta_{23} \sin 2\theta_{13} \frac{\sin([1-A]\Phi)}{[1-A]} \frac{\sin(A\Phi)}{A} \cos(\delta + \Phi) \\
 &+ \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(A\Phi)}{A^2} + O(\alpha^3)
 \end{aligned}$$

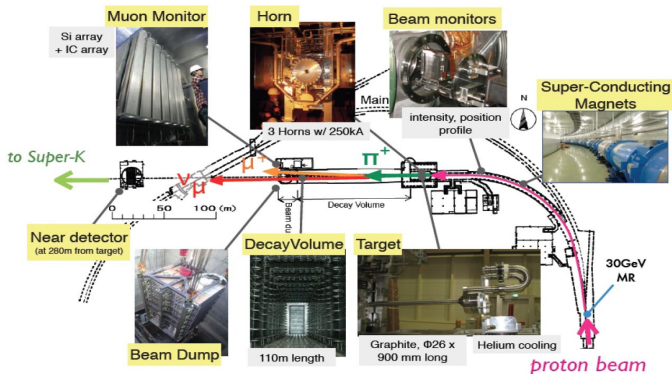
$$\Phi = \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \quad \text{Effets de matière modestes à T2K: } |A| \sim 0.07$$

# T2K: principe



- Faisceau de protons de 31 GeV produit à J-PARC
- Cible de carbone  $\leftrightarrow$  hadrons chargés
- 3 cornes magnétiques pour focaliser les hadrons chargés (+)
- Pions, kaons & muons se désintègrent dans un tunnel de 100 m
- Détecteurs **proches** à 280 m:
  - INGRID, **sur l'axe**, mesure le taux d'interactions et le profil du faisceau
  - ND280, **hors-axe**, mesure le spectre des différentes saveurs avant oscillation
- SK, détecteur **lointain hors-axe**, à 295 km, mesure le spectre des neutrinos ayant potentiellement oscillé

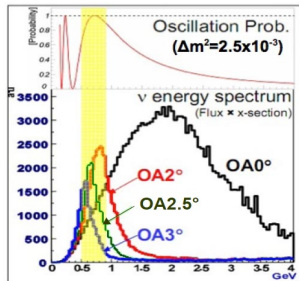
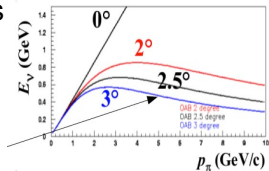
## T2K: production du faisceau de neutrinos



Intensité nominale prévue: **750 kW** ↔ Intensité atteinte avant le tremblement de terre: **145 kW**

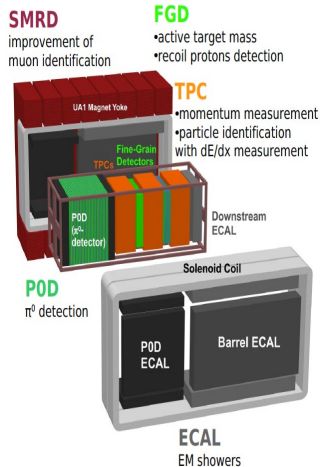
# Technique du faisceau hors-axe

- A direction d'observation *fixée*  $\neq 0^\circ$  dans le référentiel de l'expérience, la correspondance  $E_\nu \leftrightarrow E_\pi$  est **bivaluée**
- Spectre cinématique des  $\nu$ -parents  $\leftrightarrow$  **pôle** dans le jacobien  $\frac{D(E_\pi, \Omega^*)}{D(E_\nu, \Omega)}$
- $2.5^\circ$  implique un spectre étroit qui pique au premier maximum de l'oscillation  $\sim 0.6$  GeV
- Statistique plus élevée dans la région favorable. Discrimination à haute énergie avec les bruits de fond à 3 corps



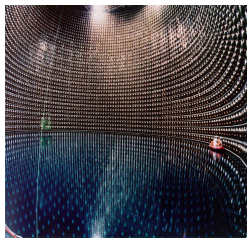
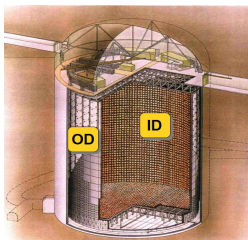
## Détecteur proche - ND280

- **Aimant de UA1/NOMAD (0.2 T)**
- **Éléments utilisés pour l'analyse Runs 1+2+3 :**
  - **FGD** (Fine Grained Detectors): cible pour les  $\nu$  et trajectographie (vertex)
  - **TPC** (Time Projection Chambers): mesure de l'impulsion et du  $dE/dx$
  - **POD** (Pi0 Detector):  $\rightarrow$  analyses pions neutres
  - **ECAL**: calorimètres électromagnétiques  $\rightarrow$  identification  $e^\pm$  et  $\gamma$
  - **SMRD**:  $\rightarrow$  détecteurs de muons

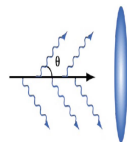


# Détecteur lointain - SuperKamiokande

- 50 kt (22.5 kt de volume fiduciel): **détecteur Cherenkov à eau**
- Equipé de 11000 PMT (détecteur interne ID: 40% de couverture)
- $\sim 2000$  PMT “regardant” vers l’extérieur (OD veto contre rayons cosmiques, radioactivité extérieure ...)
- Domaine d'efficacité:  $E_\nu \in [5.5 \text{ MeV}, \sim O(\text{GeV})]$



La lumière Cherenkov  
produit un anneau mesuré



par les PMT  
Energie déposée + temps  
d'arrivée

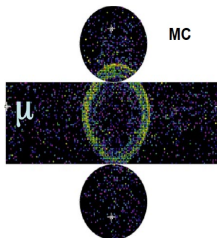
$\leftrightarrow E_\nu + \text{direction} + \text{ID}$



# Identification des particules dans SK

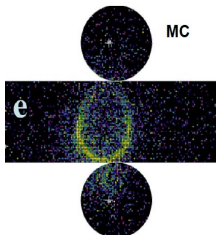
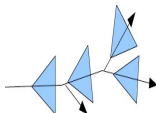
## • Muons

- peu de réinteractions
- anneaux à bords francs



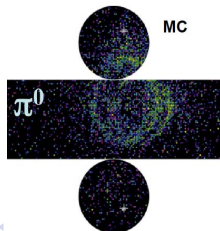
## • Electrons

- gerbe EM
- anneaux à bords flous



## • Pions neutres

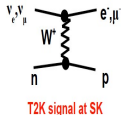
- les  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  produisent des gerbes qui peuvent être similaires à celles des électrons



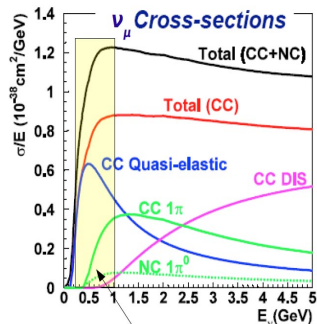
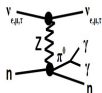
# Les interactions de neutrinos dans T2K

Dans le domaine d'intérêt en énergie :

- Contribution *majeure* des interactions quasi-élastiques par courants *chargés* (CCQE)

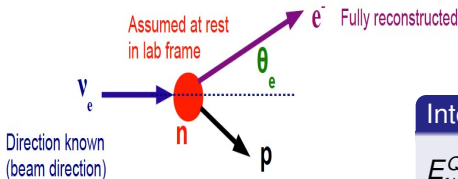


- Contribution *significative* des interactions à courants *chargés* avec “single” pion (CC1 $\pi$ )
- Interactions par courants *neutres* avec production de  $\pi^0$  (NC $\pi^0$ )  $\rightarrow$  *bruit de fond majeur*



T2K beam peak energy  
 $[\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ : gerbe avec composante électronique]

# Reconstruire l'énergie du neutrino



## Interaction quasi-élastique

$$E_{\nu}^{QE} = \frac{2M_n E_e - (M_n^2 + m_e^2 - M_p^2)}{2[M_n - E_e + \sqrt{E_e^2 - m_e^2} \cos \theta_e]}$$

- Seul est reconstruit *le lepton* dans l'état final
- L'énergie du neutrino est accessible sous certaines hypothèses:
  - La direction du neutrino est connue (direction du faisceau)
  - La masse du nucléon de recul est connue
  - Le nucléon-cible est au repos (→ le moment de Fermi ajoute de la dispersion de la mesure de l'énergie)

# Plan

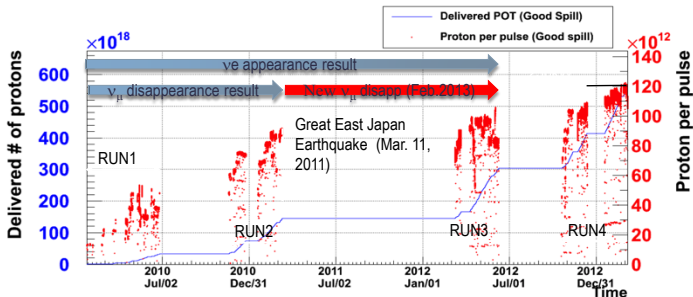
- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer  $\theta_{13}$  sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation**
- 4 Conclusion & Perspectives

# Données collectées

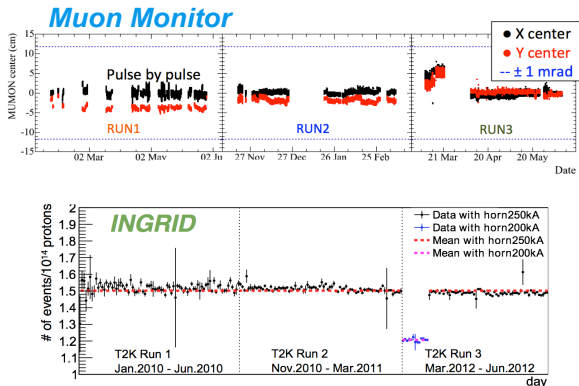
- Données cumulées **Run 1 + Run 2 + Run 3 + Run4 =  $6.39 \times 10^{20}$**  protons sur cible (12/4/2013)

**Données analysées Run 1 + Run 2 + Run 3 =  $3.01 \times 10^{20}$  protons sur cible  $\sim 4\%$  de la statistique totale prévue**

- Démarrage à **50 kW** au Run 1 mais avec **145 kW** en continu à la fin du Run 2 et **200 kW** pour le Run 3 (Feuille de route: **750 kW ...**)



# Stabilité: taux d'interaction et direction du faisceau



↔ Direction du faisceau contrôlée mieux que 1 mrad ↔ O-A INGRID

# Analyse d'oscillation - Principe actif

$$N_{\nu}^{\alpha} \propto \int \Phi^{\alpha}(E) (\times P_{osc}^{\alpha}(E, L)) \times \sigma^{\alpha}(E) \times \varepsilon_{det}^{\alpha}(E) dE$$

## **$\nu$ Flux prediction**

With external hadron production data especially from NA61@CERN

## **Neutrino Cross section**

Model(NEUT), uncertainties developed with fits to external data

## **ND280**

### **Measurement**

Momentum and angle of  $\nu_{\mu}$  CCQE and CCnonQE

- Fit the ND280 Data to refine flux and  $\nu$ -int. model

- Verification with  $\nu_e$  &  $\pi^0$  data @ND280

## **SK prediction**

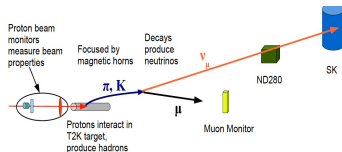
Tuned MC based on ND280 measurement



## **Comparison**

## **SK Measurement**

# Flux de neutrinos & modélisation



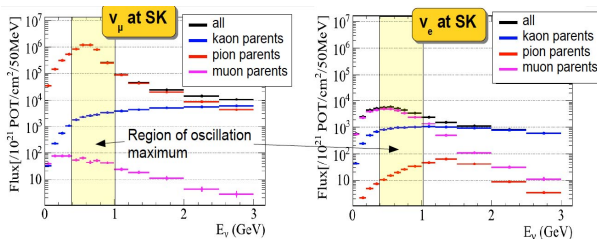
source **non-punctuelle** pour ND280

↔ Simulation du flux de neutrinos  $\propto dN/dE$  *essentielle* (extrapolation à SK)

- Mesure des moniteurs du faisceau de protons
- Production de hadrons dans la cible de carbone:  
Sections efficaces différentielles de production de  $\pi^\pm$  et de kaons simulées via FLUKA et repondération (en espace de phase) par les mesures dédiées de l'expérience "jumelle" NA61 (CERN)
- Interactions secondaires hors de la cible, focalisation par les cornes, propagation & désintégrations: Simulées via GEANT3 (...!)



# Prédiction du flux de neutrinos



- La contribution des pions au flux de  $\nu_\mu$  autour du maximum d'oscillation est majoritaire
- Les  $\nu_e$  intrinsèques du faisceau viennent des désintégrations de  $\mu$  et  $K \sim O(1\%)$  en dessous de 1 GeV
- Les  $\nu_e$  dominants au maximum d'oscillation viennent des désintégrations de muons

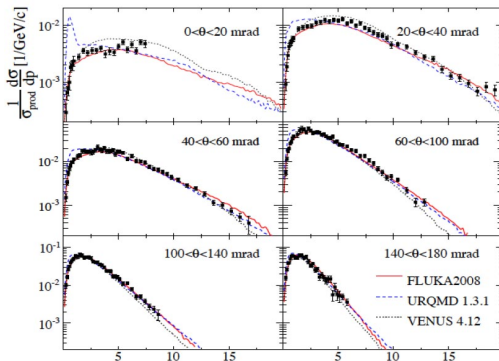
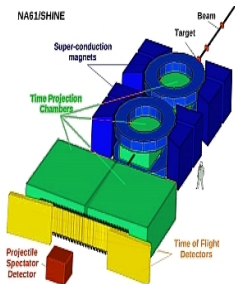
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

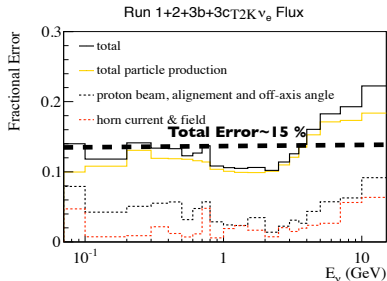
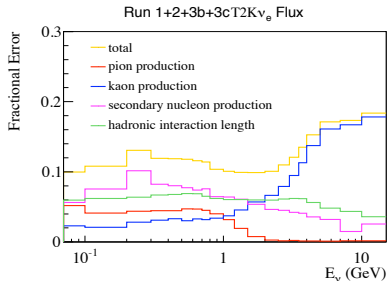
Flux depends on pion production

# Réduction des systématiques: expérience NA61

- Faisceau de protons de 31 GeV sur une reproduction de la cible fixe de carbone
- Détecteur **NA61 (CERN)**: spectromètre à grande acceptance: **TPC & TOF**  
 $\leftrightarrow$  Sections efficaces différentielles de production de  $\pi^\pm$  et K  
 e.g  $\pi^\pm$  [Abgrall et al. Phys.Rev. C 84, 034604 (2011)]

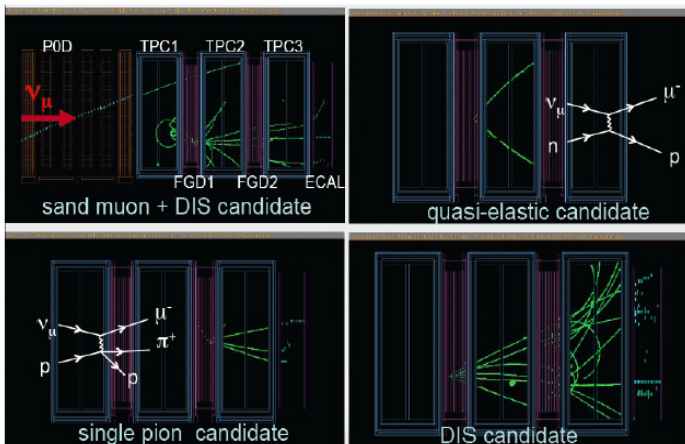


# Réduction des systématiques: expérience NA61



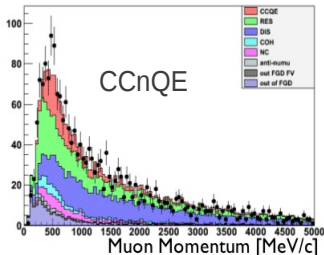
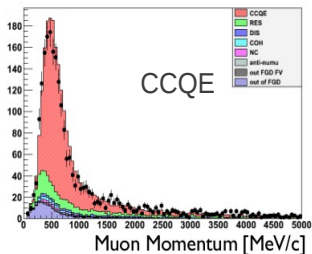
- Erreur totale de l'ordre  $O(15\%)$  dans la zone du maximum d'oscillation
- Erreur dominée par les incertitudes sur la production de particules

# Réduction des systématiques: détecteur proche



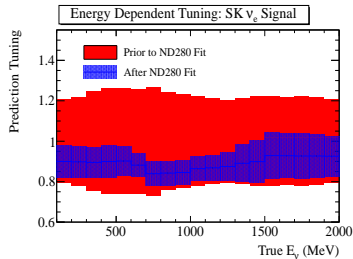
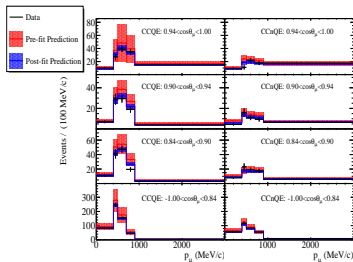
# Réduction des systématiques: détecteur proche

- Interactions à courants chargés - Sélection inclusive
  - Au moins une trace de charge négative
  - Vertex dans le premier FGD
  - $dE/dX$  de la trace de plus grande impulsion compatible avec l'identité d'un muon
- Catégorisation **CCQE** vs CCnQE
  - Une seule trace de type  $\mu^-$
  - Pas d'autre produit final de la chaîne  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  dans le FGD1



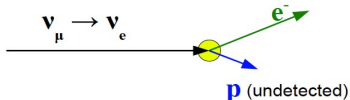
# Réduction des systématiques: détecteur proche

- Ajustement de l'espace de phase  $\{p_\mu, \theta_\mu\}$  pour contraindre **flux** et **sections efficaces d'interaction** dans la game d'énergie explorée
- Contrainte pour les flux  $\nu_\mu$  **et**  $\nu_e$



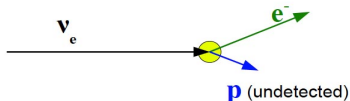
# Analyse dans le détecteur lointain SuperKamiokande

## Oscillation Signal:



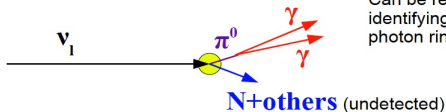
Identical for  
given neutrino  
energy.

## Beam $\nu_e$ Background:

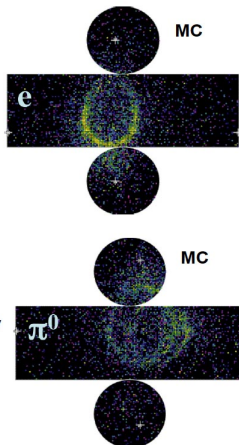


Beam  
background has  
harder spectrum

## Neutral Current $\pi^0$ :



Can be removed by  
identifying second  
photon ring

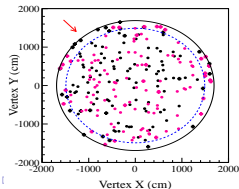
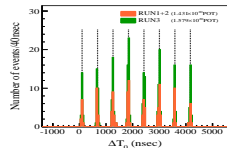


## Sélection des $\nu_e$ à SuperKamiokande [2/7]

→ Objectif: sélection d'un échantillon avec anneau unique de type électron en minimisant le bruit de fond issu du faisceau et des interactions  $NC\pi^0$

Coupures optimisées pour la statistique actuelle et **fixées avant de regarder les données**

- **-1-** Événement dans la fenêtre en temps du faisceau & complètement contenu dans l'ID [activité =0 dans OD]
- **-2-** Vertex > 200 cm du mur de l'ID [coupure de Volume Fiduciel]

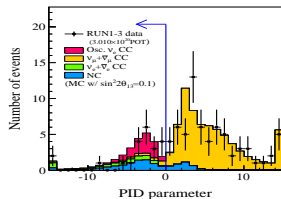




# Sélection des $\nu_e$ à SuperKamiokande [4/7]

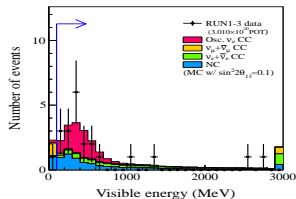
## ● -3- Sélection de *single e-like ring*

- Fonction de vraisemblance à partir de la forme des anneaux & angle d'ouverture & énergie
- Performances vérifiées sur les données atmosphériques
- Probabilité de mauvaise identification  
 $\mu \rightarrow e$ :  $\sim 1\%$



## ● -4- Energie visible > 100 MeV

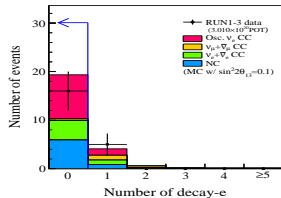
Rejette le bruit de fond NC & les électrons de  
 $\mu \rightarrow \nu_\mu \bar{\nu}_e e$  à basse énergie



# Sélection des $\nu_e$ à SuperKamiokande [6/7]

- **-5-** Pas d'électron de désintégration de  $\mu$

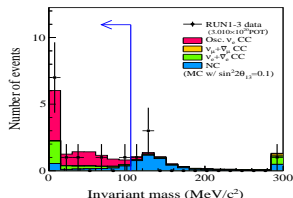
- Rejet basé sur le timing dans SK



- **-6-** Coupure sur la masse invariante

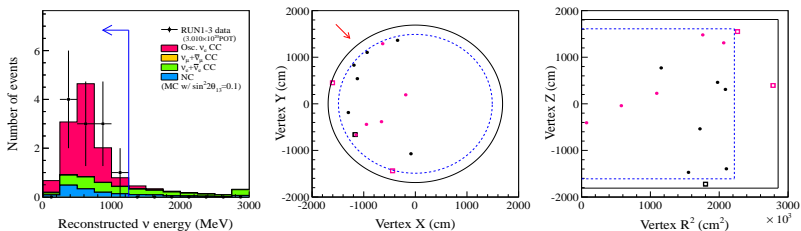
$$m_{\pi^0} < 105 \text{ MeV}/c^2$$

- Masse calculée pour chaque événement dans l'hypothèse de 2 anneaux
- Rejet du bruit de fond NC  $\pi^0$



# Sélection des $\nu_e$ à SuperKamiokande [7/7]

## ● -7- Hypothèse cinématique quasi-élastique



- Après sélection des  $\nu_e$ : **11 candidats**
  - Si pas d'oscillation, nombre attendu:  **$3.22 \pm 0.43$  événements**
- $\leftrightarrow$  p-value = 0.08% Hypothèse exclue à  $(3.2 \sigma)$

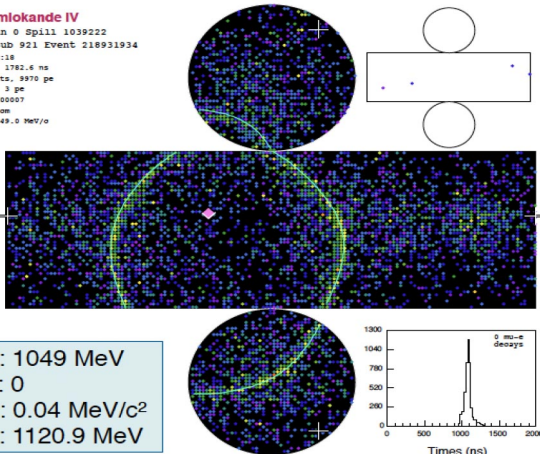
# Candidat $\nu_e$

## Super-Kamiokande IV

T2K Beam Run 0 Spill 1039222  
 Run 67969 Sub 921 Event 218931934  
 10-12-22:14:15:18  
 T2K beam dt = 1782.6 ns  
 Inner: 4804 hits, 9970 pe  
 Outer: 4 hits, 3 pe  
 Trigger: 0x80000007  
 D\_wall: 244.2 cm  
 e-like, p = 1049.0 MeV/c

### Charge (pe)

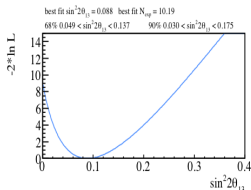
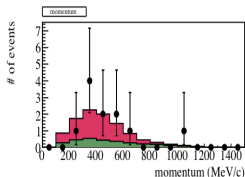
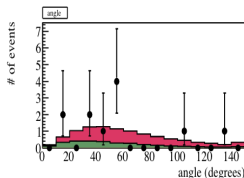
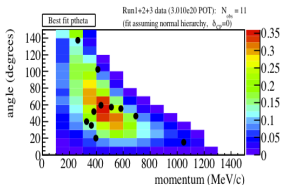
\* >26.7  
 \* 23.3-26.7  
 \* 20.2-23.3  
 \* 17.3-20.2  
 \* 14.7-17.3  
 \* 12.2-14.7  
 \* 10.0-12.2  
 \* 8.0-10.0  
 \* 6.2- 8.0  
 \* 4.7- 6.2  
 \* 3.3- 4.7  
 \* 2.2- 3.3  
 \* 1.3- 2.2  
 \* 0.7- 1.3  
 \* 0.2- 0.7  
 \* < 0.2



visible energy : 1049 MeV  
 # of decay-e : 0  
 2 $\gamma$  Inv. mass : 0.04 MeV/c<sup>2</sup>  
 recon. energy : 1120.9 MeV

# Ajustement pour $\sin^2(2\theta_{13})$

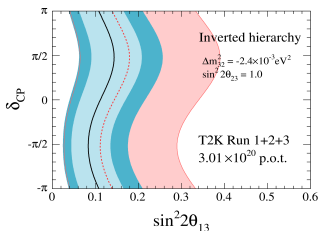
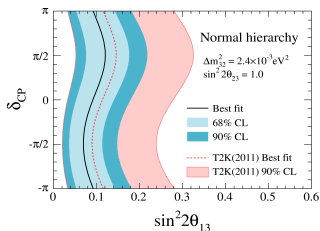
$$\mathcal{L}(N_{obs}, \vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{f}) = \mathcal{L}_{norm}(N_{obs}, \vec{\sigma}, \vec{f}) \times \mathcal{L}_{shape}(\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{f}) \times \mathcal{L}_{syst}(\vec{f})$$



- $\vec{x} = \{p_L, \theta_L\}$  espace des phases mesuré pour le lepton

# Ajustement pour $\sin^2(2\theta_{13})$

Pour  $[\sin^2(2\theta_{23}) = 1.0 \text{ et } \Delta m_{23}^2 = \pm 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2]$  fixés

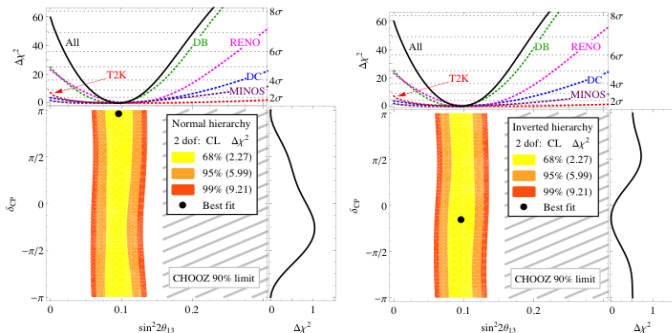


- $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.094^{+0.053}_{-0.040}$  [68% CL - Hiérarchie normale,  $\delta = 0$ ]

- $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.116^{+0.063}_{-0.049}$  [68% CL - Hiérarchie inversée,  $\delta = 0$ ]

[Abe et al. Indication of neutrino electron appearance from an accelerator produced off-axis - Phys.Rev.Lett. 107 (2011)]

# Exercice de combinaison: accélérateurs vs réacteurs



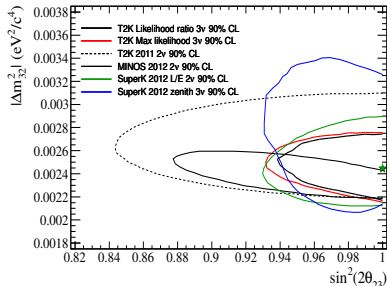
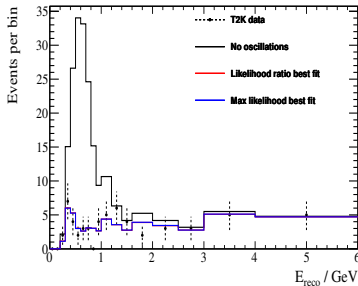
la valeur  $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$  est exclue à  $\sim 7.7 \sigma$

[Machado et al. Combining Accelerator and Reactor Measurements of  $\theta_{13}$ : The First

Result JHEP 1205 (2012) 023]



# Analyse en disparition $\nu_\mu$ - Mesure de $\theta_{23}$



- Ajustement:  $\sin^2 2\theta_{23} \geq 0.94$  (90% C.L)  
 $2.14 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 < |\Delta m_{32}^2| < 2.76 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  (90% C.L)
- Valeur centrale:  $\sin^2 2\theta_{23} = 1.00$  ( $\theta_{23}$  scenario maximal ...?)

[Abe et al. Precision Muon Neutrino Disappearance Measurements by the T2K Experiment

- PRL submitted (2013)]



# Plan

- 1 Masse & oscillations de neutrinos
- 2 Mesurer  $\theta_{13}$  sur accélérateur: l'expérience T2K
- 3 Résultats & interprétation
- 4 Conclusion & Perspectives

## Conclusion & Perspectives

Avec la statistique analysée sur les 3 premières sessions de prise de données ( $\sim 4\%$  du total prévu et malgré un tremblement de terre majeur):

- **11** candidats  $\nu_e$  sont observés à SK (pour **3.2** attendus sans oscillation)  
→ *évidence d'une apparition à  $3.2 \sigma$*
- **58** candidats  $\nu_\mu$  sont observés à SK (pour **207** attendus sans oscillation)  
→ *Contrainte la plus forte à ce jour sur  $\sin^2 2\theta_{23}$*
- La nature a eu la “délicatesse” de fournir une valeur vraisemblablement non-nulle pour  $\theta_{13}$   
(et raisonnablement large:  $\sin^2 2\theta_{13} = O(0.1)$ )

Dans un futur (très ;-)) proche: mesure précise de  $\sin^2 2\theta_{13}$  à  $5 \sigma$  et (peut-être/sûrement ?) jeter les bases pour  $\delta$

## Epilogue: Nouvelle(s) question(s)

- Mélange des leptons

$$|U_{PMNS}| \sim \begin{pmatrix} O(1) & O(1) & \epsilon \\ O(1) & O(1) & O(1) \\ O(1) & O(1) & O(1) \end{pmatrix}$$

Mélange important

Structure *Tri-Bimaximale* ? ( $\theta_{23} = 45^\circ$ ,  $\theta_{12} = 35^\circ$ ,  $\theta_{13} = 0$  ? **NON**)

- Mélange des quarks

$$|U_{CKM}| \sim \begin{pmatrix} O(1) & \epsilon & \epsilon^3 \\ \epsilon & O(1) & \epsilon^2 \\ \epsilon^3 & \epsilon^2 & O(1) \end{pmatrix}$$

Mélange faible. Structure fortement *hiérarchique*

Quelle est la conjecture qui pilote la structure en saveur (symétries ?) à l'échelle électrofaible ?

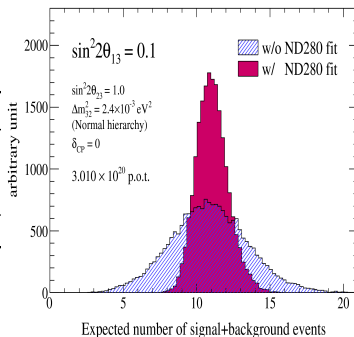
## Fin de l'épisode



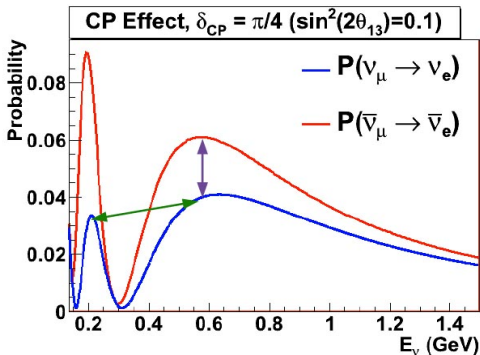
# Backup - $\theta_{13}$ - Incertitudes systématiques

Incertitudes sur le nombre d'événements  $\nu_e$  attendus:

Incertitudes	$\nu_e$ sig+bkg
Flux + Sections Efficaces (ND280)	$\pm 5.7\%$
Sections Efficaces (hors ND280)	$\pm 7.5\%$
Détecteur lointain	$\pm 3.9\%$
Total	$\pm 10.3\%$



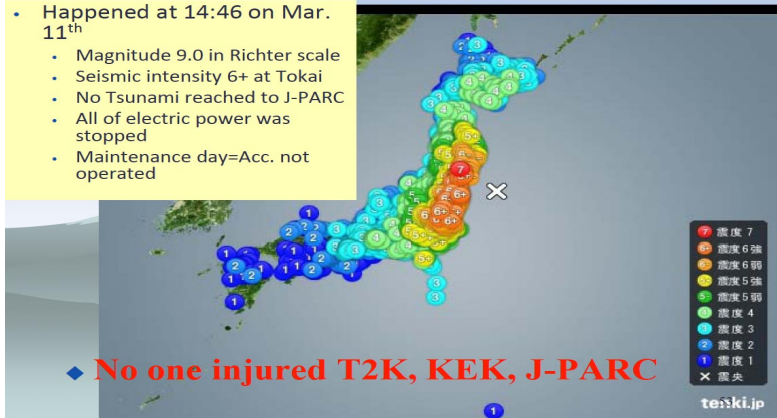
## Backup - Violation de CP: accès



# Backup - Tremblement de terre 2011

## Earthquake on Mar. 11th

- Happened at 14:46 on Mar. 11<sup>th</sup>
  - Magnitude 9.0 in Richter scale
  - Seismic intensity 6+ at Tokai
  - No Tsunami reached to J-PARC
  - All of electric power was stopped
  - Maintenance day=Acc. not operated



# Backup - Tremblement de terre 2011

## Ground level damages

