

OSCILLATIONS de NEUTRINOS

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

ARNAUD ROBERT ¹

¹ *Université Pierre et Marie Curie - LPNHE*

Arnaud.Robert@cern.ch



Plan

- 1 Introduction - Quelle masse pour le neutrino ?
- 2 Oscillations de neutrinos
- 3 Résultats de l'expérience T2K et la quête de l'angle θ_{13}
- 4 Conclusion & Perspectives

Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- La prélogie ou les faits expérimentaux ... il y a bien longtemps (dans une galaxie lointaine ... très lointaine)

[Pauli, Reines & Cowan, Goldhaber et al., Lederman et al.,

LEP (Z^0), cosmologie (Y)...]

Un (anti)neutrino détectable ($\bar{\nu}$) est un fermion électriquement neutre, d'hélicité gauche(droite), et se décline en 3 saveurs actives: ν_e, ν_μ, ν_τ

- Et un modèle:

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}

$Q_L(3, 2)_{+1/6}, U_R(3, 1)_{+2/3}, D_R(3, 1)_{-1/3}, L_L(1, 2)_{-1/2}, E_R(1, 1)_{-1}$
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
- Pour faire sens, la théorie doit être **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 ($|\Delta L| = 2$) générée au niveau perturbatif

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

\leftrightarrow pas de masse générée par une configuration non-perturbative des champs de jauge

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

Cosmologie: $\Sigma m_\nu < 0.19$ eV (95% C.L.)

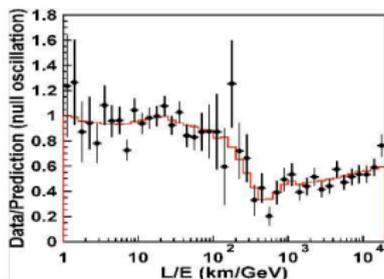
[Fogli et al, Phys. Rev. D 78 033010, (2008)]

Neutrino & Modèle Standard Electrofaible Minimal

- Cependant ...  dans le cours de l'histoire ...

[Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos

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



- oscillations de saveur ν_μ
→ secteur **atmosphérique**
- oscillations confirmées pour ν_e
→ secteur **solaire**

[SNO, SK, Borexino, Chlorine, Gallium

+ KamLand ($\bar{\nu}_e$)]

Les états libres de propagation du neutrino n'ont pas de saveur bien déterminée (mélange) $\leftrightarrow \exists$ des états propres de masse non-dégénérés $\nu_1, \nu_2, \nu_3 \leftrightarrow$ **Le neutrino est massif**

Digression: modèle de masse pour le neutrino

Plus de questions que de réponses ...

fermion neutre & représentation $\{1/2 \oplus 1/2\}$ 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 demeure 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 sans renoncer aux racines du MSE ?

On peut introduire n_s neutrinos *stériles* dans une sixième représentation $N_R(1, 1)_0$ de G_{SM}

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

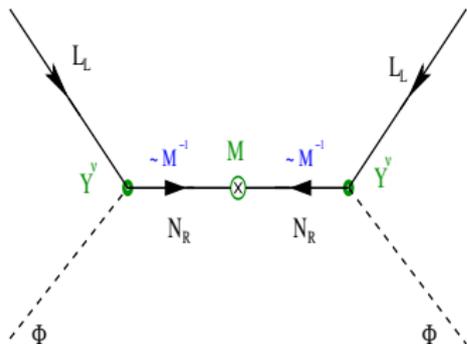
$U(1)_{B-L}$ toujours symétrie globale mais $Y^\nu / Y^{\text{top}} \sim O(10^{-12})$ est peu naturel vis à vis du secteur des quarks

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

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

Digression: modèle de masse pour le neutrino

- Illustration: cas du mécanisme de bascule (See-Saw)



- Champs massifs \leftrightarrow diagonalisation de \mathcal{L}_m^M

- EWSB et $M \gg Y^\nu \langle \Phi \rangle \leftrightarrow LL\Phi\Phi$
lagrangien effectif de dimension 5

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

- Masse à l'arbre: $SU(2)_L \leftrightarrow$ triplet de scalaires (type II), de fermions (type III) ?

- Renoncer à la renormalisabilité: $-\mathcal{L}_{d=5}^M = C_{ij} \frac{(\bar{L}_{iL}^C \tilde{\Phi}^*)(\tilde{\Phi}^\dagger L_{jL})}{\Lambda_{NP}}$

- $U(1)_{B-L}$ jaugée ? - Introduire $G \supset G_{SM} \dots SO(10) \dots ?$

Neutrinos massifs & physique des saveurs

- 6(5) représentations de G_{SM} - Paradigme à 3 saveurs
 $\leftrightarrow \exists$ une symétrie *globale* $G^{\mathcal{M}} = [U(3)]^{6(5)}$ pour le lagrangien non-massif
- Brisure par les couplages de masse:
 - $\mathcal{L}_{m,Q}^Y + \mathcal{L}_{m,L}^Y$ $[U(3)]^{6(5)} \rightarrow U(1)_B \times U(1)_L$
 - $\mathcal{L}_{m,Q}^Y + \mathcal{L}_{m,L}^M$ $[U(3)]^{6(5)} \rightarrow U(1)_B$
- Paramètres irréductibles [inabsorbables par les éléments de $G^{\mathcal{M}}$]

Pour le secteur des saveurs leptoniques actives:

Dirac

Majorana

9 modules dont **6** masses

1 phase violant CP

9 modules dont **6** masses

3 phases violant CP

Plan

- 1 Introduction - Quelle masse pour le neutrino ?
- 2 Oscillations de neutrinos**
- 3 Résultats de l'expérience T2K et la quête de l'angle θ_{13}
- 4 Conclusion & Perspectives

Mélange des saveurs

- Base diagonale des couplages de masse:

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

- U matrice (... unitaire ...) de mélange par courants chargés 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)]

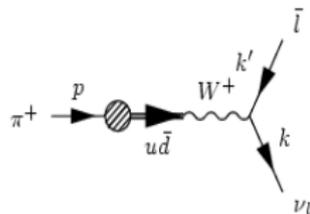
- Paramétrisation standard avec 3 angles de mélange $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ et 1+2 phases de violation de CP

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

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**:



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

Si l'état $|\pi^+\rangle$ est *bien déterminé* \rightarrow *oscillation de saveur impossible ...*

- Oscillation possible si **désintrication** (rapide) du lepton associé \rightarrow

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

$\mathcal{F}_\xi(T, X, \vec{k}_i)$: localisation du paquet d'onde dans l'espace-temps $[\sigma_X, \sigma_T]$

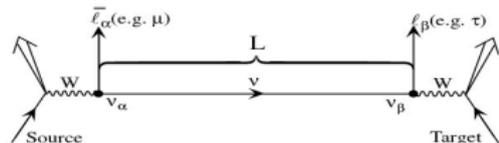
Encore un peu de mécanique quantique

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

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

Longueur d'oscillation: $L_{ij}^{\text{osc}} = \frac{4\pi E_\nu}{\Delta m_{ij}^2}$

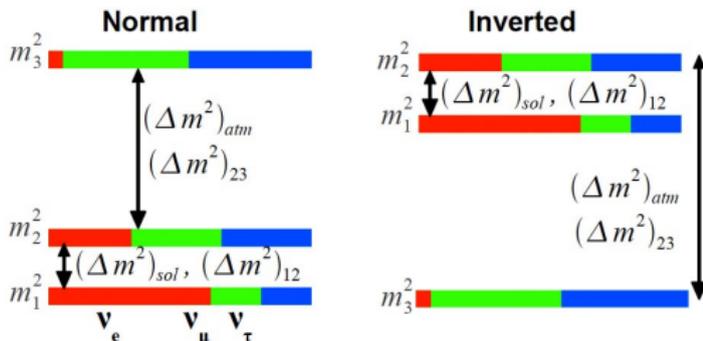
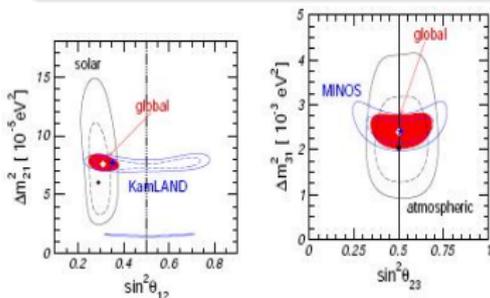
Longueur de cohérence: $L_{ij}^{\text{coh}} = \frac{4\sqrt{2}E_\nu^2}{|\Delta m_{ij}^2|} \sigma_X$



- $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta, L, [E_\nu])$ est insensible aux phases de Majorana η_{ij}

Oscillations de neutrinos - Etat de l'art

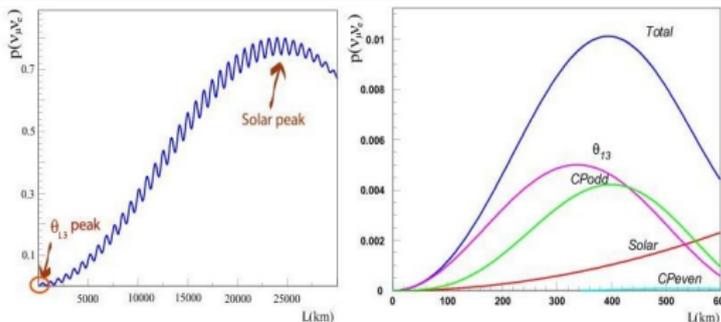
- Secteur solaire: $\sin^2(2\theta_{12}) = 0.87 \pm 0.03$ $\Delta m_{12}^2 = 7.59 \pm 0.20 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
[SNO, KamLand, SK]
- Secteur atmosphérique: $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.92$ (90%C.L.) $|\Delta m_{23}^2| = 2.43 \pm 0.13 \times 10^{-3} \text{eV}^2$
[SK, K2K, MINOS]
- $\sin^2(2\theta_{13})$ [MINOS, T2K \rightarrow Cet exposé, CHOOZ]



2 hiérarchies de masse possibles

\leftrightarrow ambiguïté levée par les effets de matière dans le secteur solaire

Mesurer θ_{13} sur accélérateur



$$[\sin^2(2\theta_{13}) = 0.01, \delta = -\pi/2]$$

$$\langle E_\nu \rangle = 1.0 \text{ GeV}$$

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, L, [E_\nu]) &= 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu} \times \left(1 + \frac{2a}{\Delta m_{13}^2} (1 - 2s_{13}^2) \right) \\
 &+ 8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} \{ c_{12} c_{23} \cos \delta - s_{12} s_{13} s_{23} \} \cos \frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E_\nu} \sin \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu} \sin \frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu} \\
 &- 8c_{13}^2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta \sin \frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu} \sin \frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu} \\
 &+ 4s_{12}^2 c_{13}^2 \{ c_{13}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2c_{12} c_{23} s_{12} s_{23} s_{13} \cos \delta \} \sin \frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu} \\
 &- 8c_{12}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \cos \frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E_\nu} \sin \frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E_\nu} \times \frac{aL}{4E_\nu} (1 - 2s_{13}^2)
 \end{aligned}$$

Retour vers le futur - Mesure de δ

- Pour les leptons la magnitude de la violation de CP est régie par l'invariant de Jarlskog J_{CP}^L

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

- secteur de Dirac:

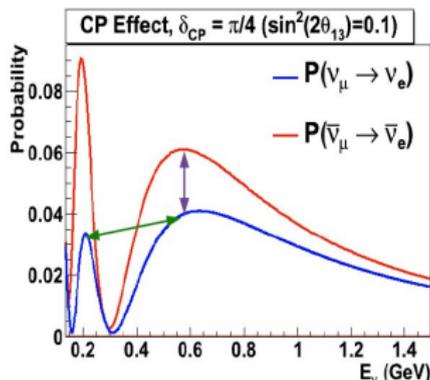
$$J_{CP}^L = \Im(U_{\mu 3} U_{e 3}^* U_{e 2} U_{\mu 2}^*)$$

$$= s_{12} s_{23} s_{13} c_{12} c_{23} c_{13}^2 \sin \delta$$

- J_{CP}^L est *inconnu*

→ 2 façons de mesurer δ

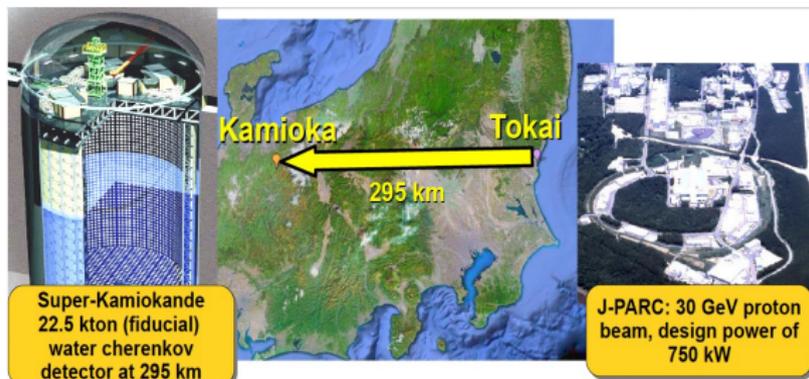
- Asymétrie $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ vs $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$
- Observer le premier et le second maximum d'oscillation en mode neutrino



Plan

- 1 Introduction - Quelle masse pour le neutrino ?
- 2 Oscillations de neutrinos
- 3 Résultats de l'expérience T2K et la quête de l'angle θ_{13}**
- 4 Conclusion & Perspectives

T2K: Tokai to Kamioka



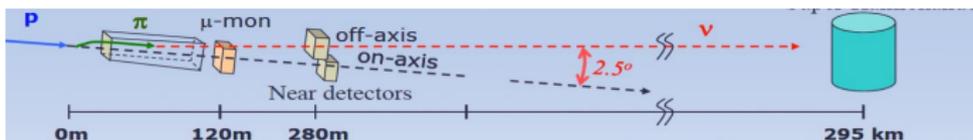
Buts fondateurs de l'expérience:

- Mise en évidence et mesure d'apparition de la saveur ν_e

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e, L) \sim \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E_\nu}\right) + O_\delta\left(\left|\frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{23}^2}\right|\right)$$

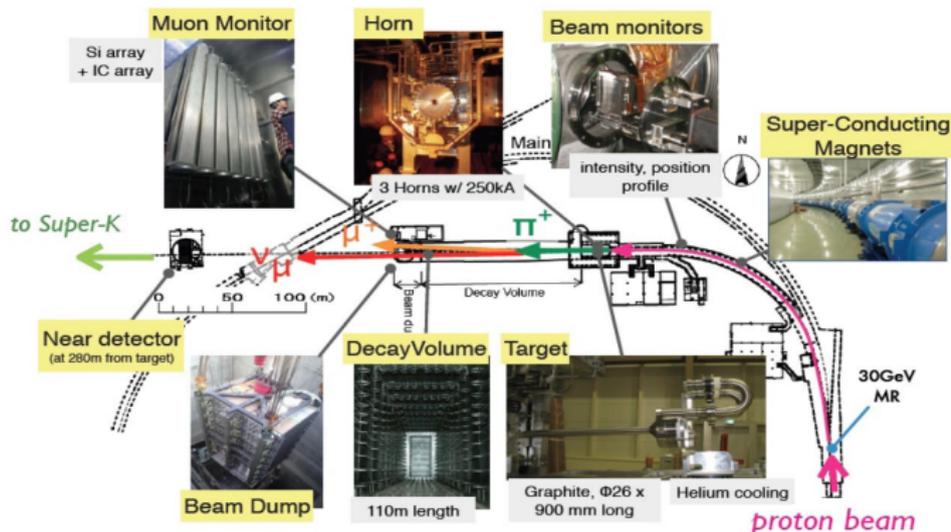
- Mesures de précisions dans le secteur atmosphérique
↔ Disparition de saveur ν_μ

T2K: principe



- Faisceau de protons de 30 GeV produit à J-PARC
- Cible de carbone ↔ 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

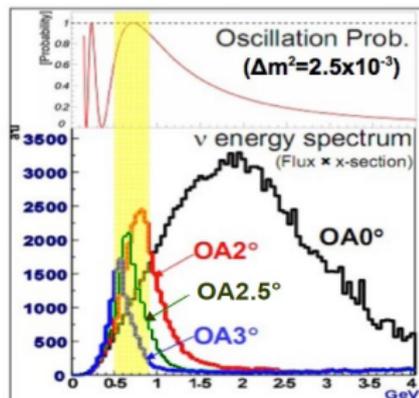
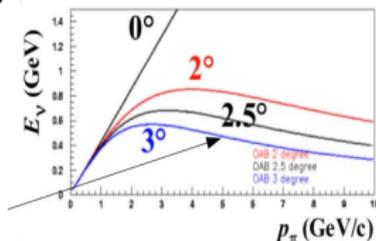


Intensité nominale prévue: **750 kW** ↔ Intensité atteinte avant le tremblement de terre: **145 kW**

Pourquoi le principe du faisceau hors-axe ?

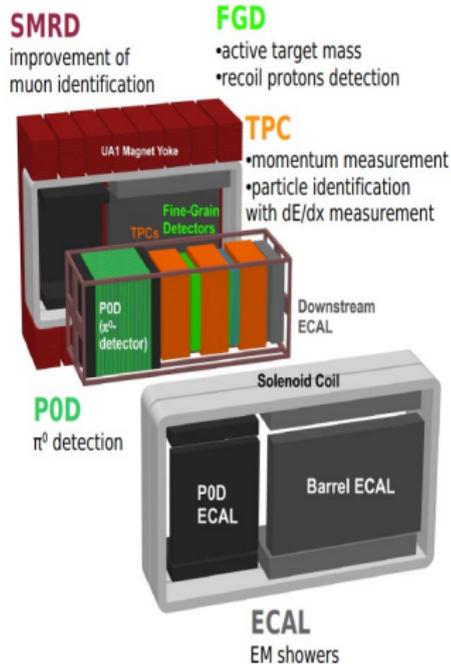
- A direction d'observation *fixée* $\neq 0^\circ$ dans le référentiel de l'expérience, la correspondance $E_\nu \leftrightarrow E_\pi$ est *bivaluée*

$$\left[\tan \frac{\theta_\nu^*}{2} = \sqrt{\frac{1+\beta_\pi}{1-\beta_\pi}} \tan \frac{\theta_\nu}{2} \right]$$
- Spectre cinématique des ν -parents \leftrightarrow pôle dans le jacobien $\frac{D(E_\pi, \Omega^*)}{D(E_\nu, \Omega)}$
- 2.5° implique un spectre étroit qui pique au premier maximum de l'oscillation ~ 0.6 GeV
- Statistique plus élevée dans la région favorable. Moins de queues à haute énergie pour les bruits de fond à 3 corps



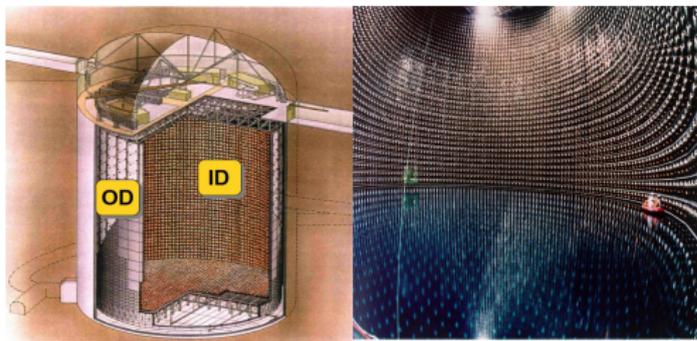
Détecteur proche - ND280

- Aimant de UA1/NOMAD (0.2 T)
- **Éléments utilisés pour l'analyse 2011:**
 - **FGD** (Fine Grained Detectors): cible pour les ν et trajectographie (vertex)
 - **TPC** (Time Projection Chambers): mesure de l'impulsion et du dE/dx
- **Importants pour les analyses futures:**
 - **POD** (Pi0 Detector): mesure le taux de π^0 produits par courants neutres (ν_μ)
 - **ECAL**: calorimètres électromagnétiques pour identifier e^\mp et γ
 - **SMRD**: détecteurs de μ

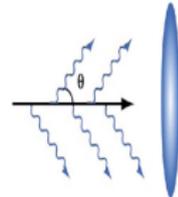


Détecteur lointain - SuperKamiokande

- 50 kt (22.5 kt de volume fiduciel): détecteur Cherenkov à eau
- Equipé de 11000 PMT (détecteur interne ID: 40% de couverture)
- ~ 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



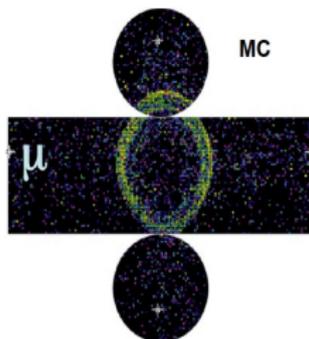
par les PMT
Energie déposée + temps
d'arrivée

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

Identification des particules dans SK

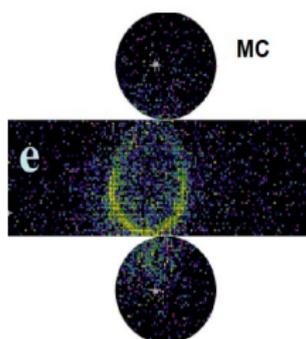
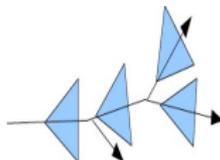
• Muons

- peu de scattering
- anneaux à bords francs



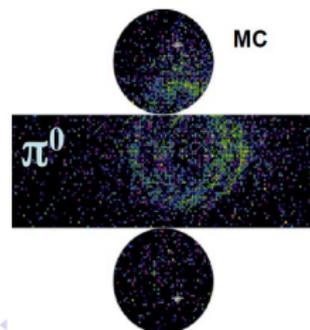
• Electrons

- gerbe EM
- anneaux à bords flous



• Pions neutres

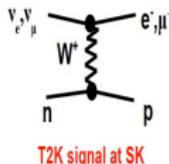
- les $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ produisent des gerbes qui peuvent être similaires à celles des électrons



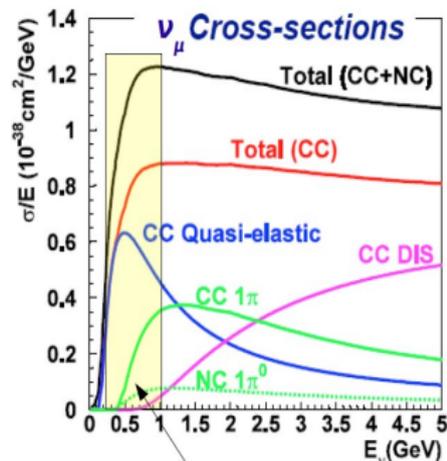
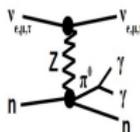
Les interactions de neutrinos dans T2K

Dans le domaine d'intérêt en énergie :

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



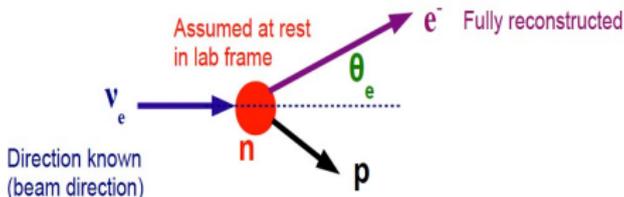
- Contribution significative des interactions à courants *chargés* avec "single" pion (CC1 π)
- Interactions par courants *neutres* avec production de π^0 (NC1 π^0) \rightarrow bruit de fond majeur



[$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$: gerbe avec composante

électronique]

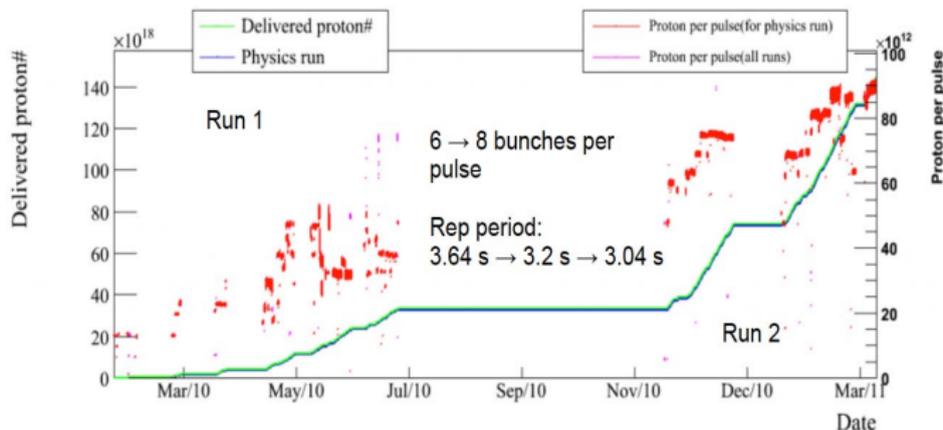
Reconstruire l'énergie du neutrino



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

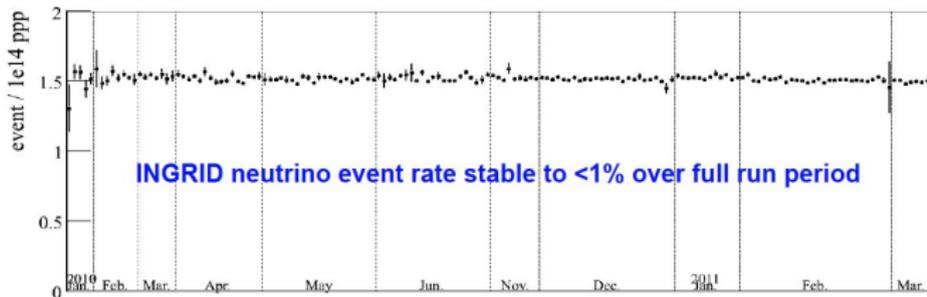
- Seul est reconstruit le lepton dans l'état final
- L'énergie du neutrino est accessible sous certaines hypothèses:
 - La direction du neutrino est connue (direction du faisceau)
 - La masse du nucléon de recul est connue
 - Le nucléon-cible est au repos (\rightarrow le moment de Fermi ajoute de la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

Données collectées



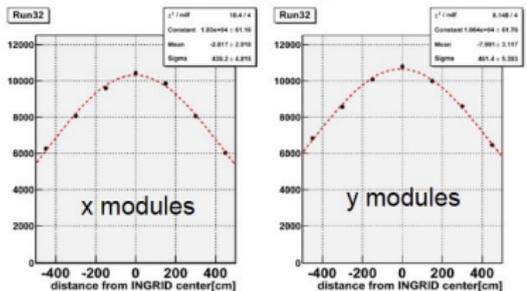
- Données cumulées Run 1 + Run 2 = 1.43×10^{20} protons sur cible
- Démarrage à **50 kW** au Run 1 mais avec **145 kW** en continu à la fin du Run 2 [feuille de route pour atteindre **750 kW**: augmenter le nombre de paquets par impulsion, le nombre de protons par paquet, le taux de répétition]
- 2% de la statistique prévue pour T2K a été accumulée et analysée

Stabilité: taux d'interaction et direction du faisceau

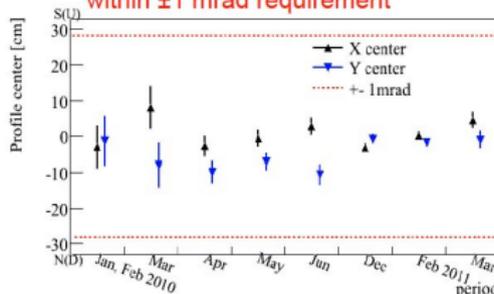


integrated day(1 data point / 1day)

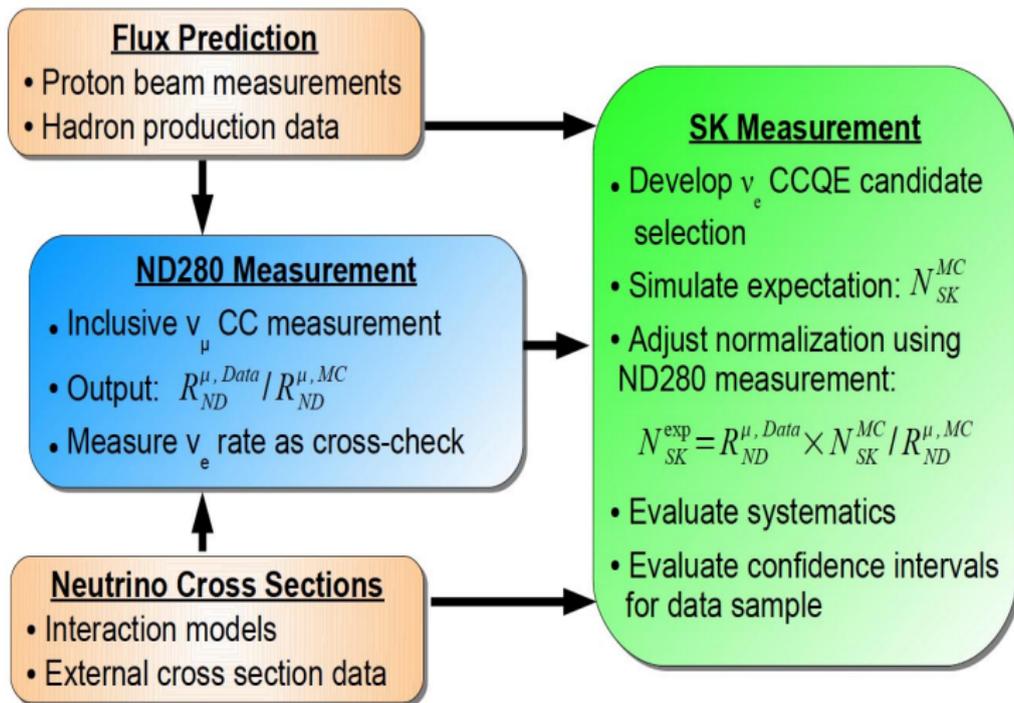
INGRID Profiles



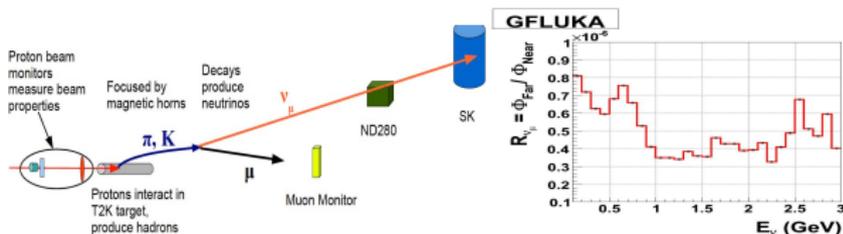
INGRID confirms beam direction within ± 1 mrad requirement



Analyse d'oscillation - Principe actif



Flux de neutrinos & modélisation



Extrapolation \leftrightarrow Simulation du flux de neutrinos *essentielle*

- mesure des moniteurs du faisceau de protons
- Production de hadrons dans le cible de carbone:
 - Données de l'expérience NA61 (CERN) pour modéliser la production de π^\pm
 - Production de Kaons & autres interactions hadroniques: modélisation via FLUKA (dans l'attente des résultats de NA61)
- Interactions secondaires hors de la cible, focalisation par les cornes, propagation & désintégrations:
 - Simulées via GEANT3 (!)
 - Sections efficaces d'interaction ajustées aux données existantes



Digression: résultats de la collaboration NA61

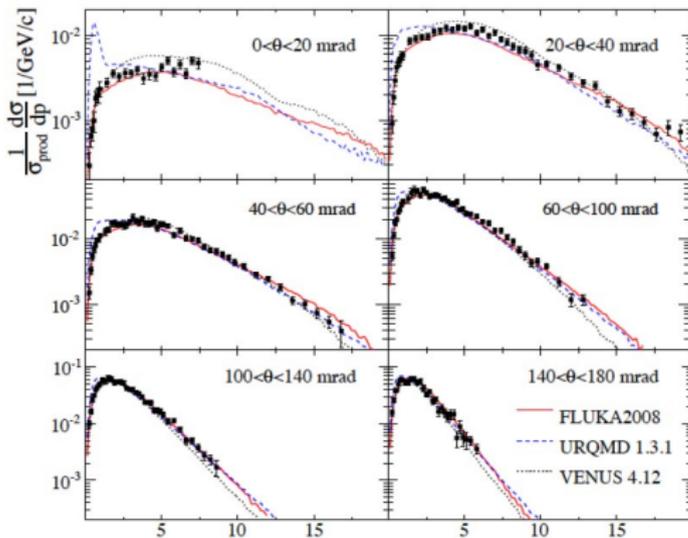
Faisceau de protons de 30 GeV sur cible fixe de carbone

NA61: spectromètre à grande acceptance: **TPC & TOF**

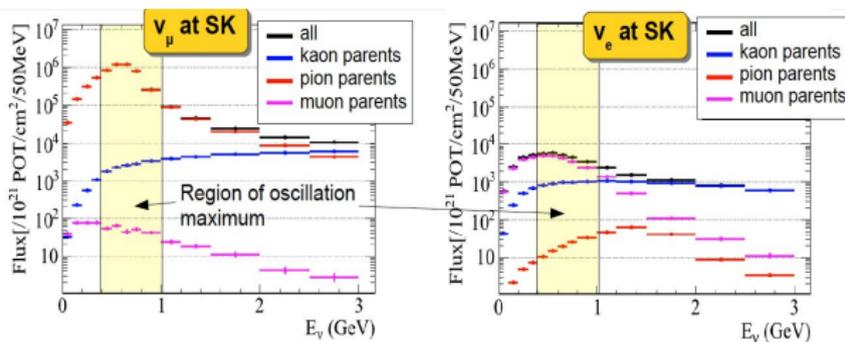
↔ Sections efficaces différentielles de production de π^\pm

[Abgrall et al. Phys.Rev. C 84, 034604 (2011)]

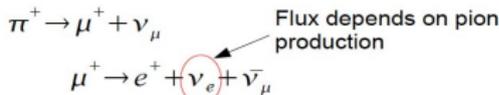
- Effets systématiques de 5 – 10% pour chaque point de l'espace $p - \theta$
- Incertitudes propagées dans la simulation du flux pour l'analyse d'oscillation de T2K



Prédiction du flux de neutrinos

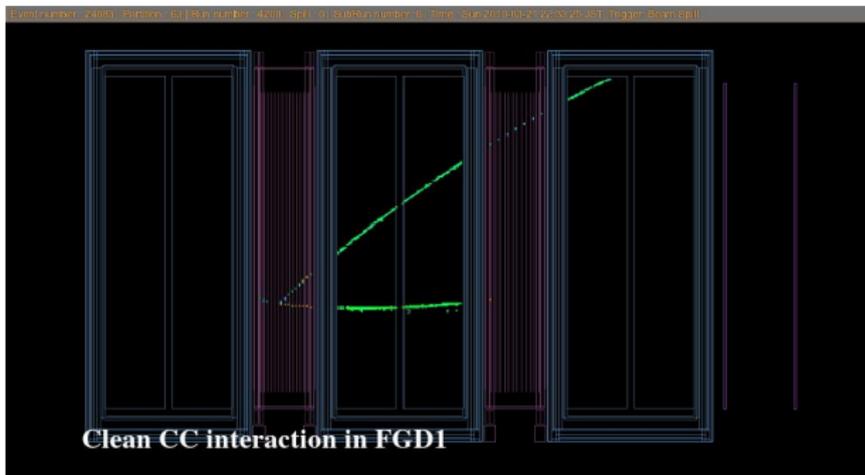


- La contribution des pions au flux de ν_μ autour du maximum d'oscillation est majoritaire
- Les ν_e intrinsèques du faisceau viennent des désintégrations de μ et $K \sim O(1\%)$ en dessous de 1 GeV
- Les ν_e dominants au maximum d'oscillation viennent des désintégrations de muons

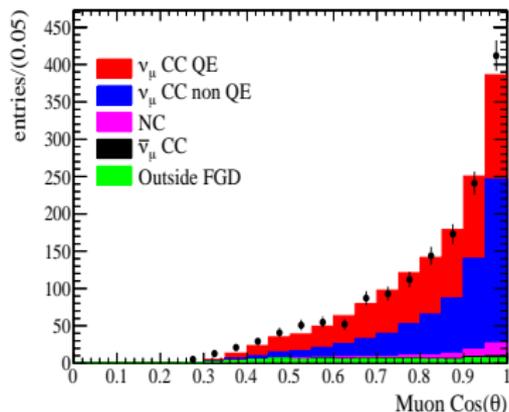
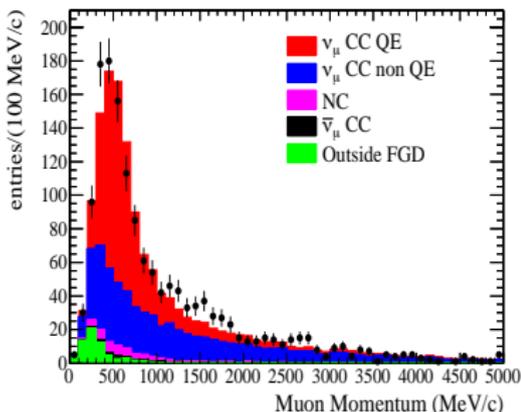


Analyse inclusive des ν_{μ} dans ND280

- Sélection d'événements avec au moins une trace négative μ -like démarrant dans un FGD et traversant les TPC successives
- 2.88×10^{19} POT \leftrightarrow 1529 candidats



Analyse inclusive des ν_{μ} dans ND280

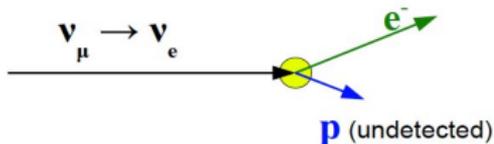


- Modèle: NA61 + FLUKA (flux) - NEUT (interaction)
- Pureté: 90% pour les ν_{μ} CC et 50% pour les ν_{μ} CCQE

$$R_{ND}^{\mu, \text{data}} / R_{ND}^{\mu, \text{MC}} = 1.036 \pm 0.028 \text{ (stat)}_{-0.037}^{+0.044} \text{ (syst)} \pm 0.038 \text{ (mod)}$$

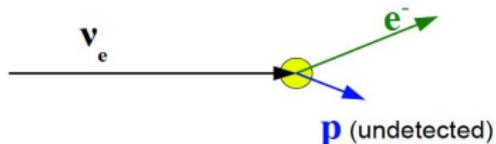
Signal & bruit de fond pour SuperKamiokande

Oscillation Signal:



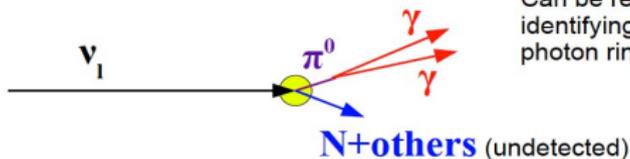
Identical for given neutrino energy.

Beam ν_e Background:

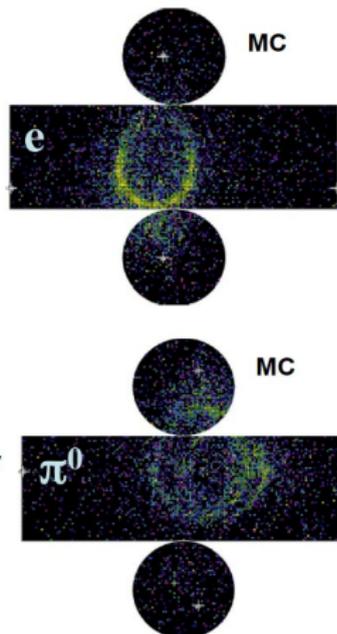


Beam background has harder spectrum

Neutral Current π^0 :



Can be removed by identifying second photon ring

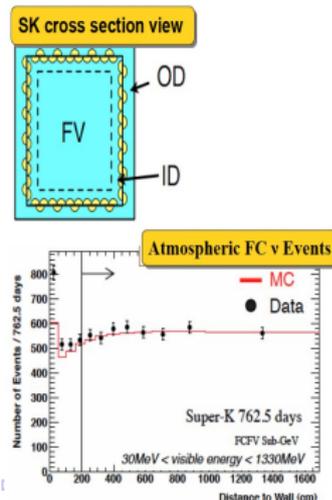


Sélection des ν_e à SuperKamiokande [2/7 étapes]

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

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

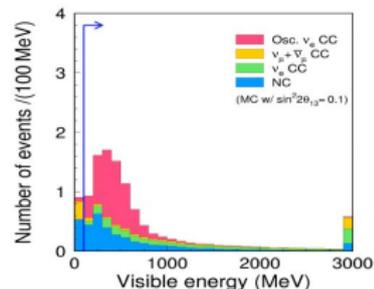
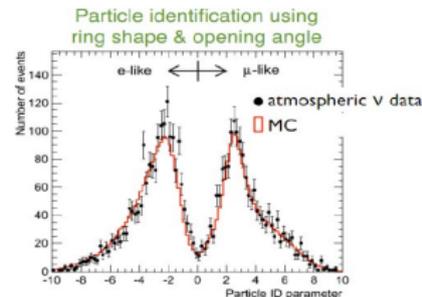
- **-1-** Événement dans la fenêtre en temps du faisceau & complètement contenu dans l'ID [activité =0 dans OD]
- **-2-** Vertex > 200 cm du mur de l'ID [coupure de Volume Fiduciel]



Sélection des ν_e à SuperKamiokande [4/7 étapes]

- **-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
 $\mu \rightarrow e$: $\sim 1\%$

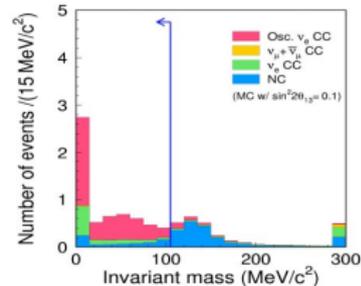
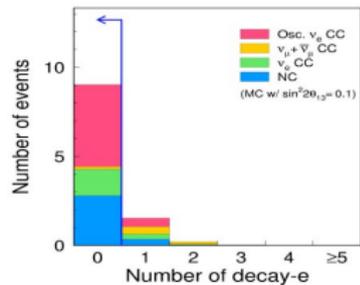
- **-4-** Energie visible > 100 MeV
Rejette le bruit de fond NC & les électrons de $\mu \rightarrow \nu_\mu \bar{\nu}_e e$ à basse énergie



Sélection des ν_e à SuperKamiokande [6/7 étapes]

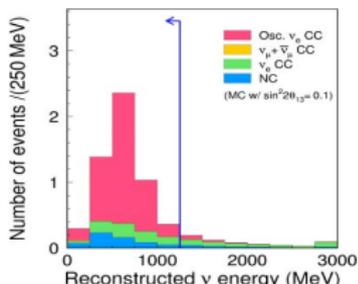
- **-5-** Pas d'électron de désintégration de μ
 - Rejet basé sur le timing dans SK

- **-6-** Coupure sur la masse invariante
 - Masse caculée pour chaque événement dans l'hypothèse de 2 anneaux
 - Rejet du bruit de fond NC π^0



Sélection des ν_e à SuperKamiokande [7/7 étapes]

- **-7-** Energie du neutrino reconstruite < 1250 MeV
 - Rejet des ν_e intrinsèques énergétiques provenant de la désintégration de kaons



Efficacité au signal: 66%
 Réjection du bruit fond: 77% pour ν_e du faisceau et 99% pour ν_e de $\text{NC}\pi^0$

Nombre d'événements attendus calculé génériquement par le rééchelonnement:

$$N_{SK}^{exp} = N_{SK}^{MC} \times R_{ND}^{\mu,data} / R_{ND}^{\mu,MC}$$

Sources	N_{SK}^{exp}
NC background	0.6
Beam ν_e background	0.8
Osc. through θ_{12}	0.1
ν_μ CC background	0.03
Total	1.5 ± 0.3

Incertitudes systématiques

$$N_{SK}^{\text{exp}} = R_{ND}^{\mu, \text{Data}} \times N_{SK}^{\text{MC}} / R_{ND}^{\mu, \text{MC}}$$

Ignoring sums over neutrino flavors, interaction modes

$$\frac{\int \Phi_{\nu_{\mu}(\nu_e)}^{SK}(E_{\nu}) \cdot P_{osc}(E_{\nu}) \cdot \sigma(E_{\nu}) \cdot \epsilon_{SK}(E_{\nu}) dE_{\nu}}{\int \Phi_{\nu_{\mu}}^{ND}(E_{\nu}) \cdot \sigma(E_{\nu}) \cdot \epsilon_{ND}(E_{\nu}) dE_{\nu}} \cdot \frac{M_{SK}}{M_{ND}} \cdot POT_{SK}$$

- ND280 statistical uncertainty
- Flux uncertainty → expect cancellation in ratio
- Neutrino interaction cross section uncertainties
- SK reconstruction, selection uncertainties
- ND280 reconstruction, selection uncertainties

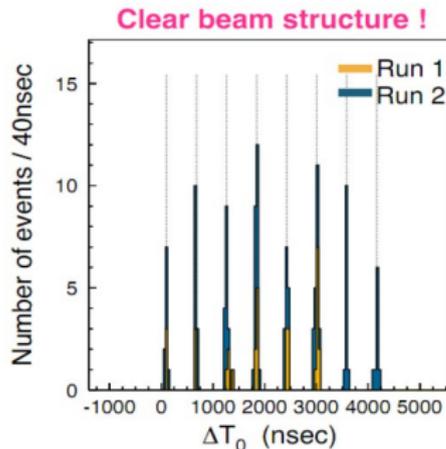
Incertitudes systématiques

Error Source	$\sin^2(2\theta_{13})=0$	$\sin^2(2\theta_{13})=0.1$
Beam flux	8.5%	8.5%
ν cross sections	14.0%	10.5%
ND280 detector	+5.6 % -5.2 %	+5.6 % -5.2 %
SK detector	14.7%	9.4%
ND280 statistics	2.7%	2.7%
Total	+22.8 % -22.7 %	+17.6 % -17.5 %

↑
Smaller cross section and SK
uncertainties for signal events

Echantillon de données

- SK synchronized to beam timing using GPS
- SK events fully contained in the ID show clear beam time structure
- In total, 121 FC events
 - Non beam background from timing sidebands

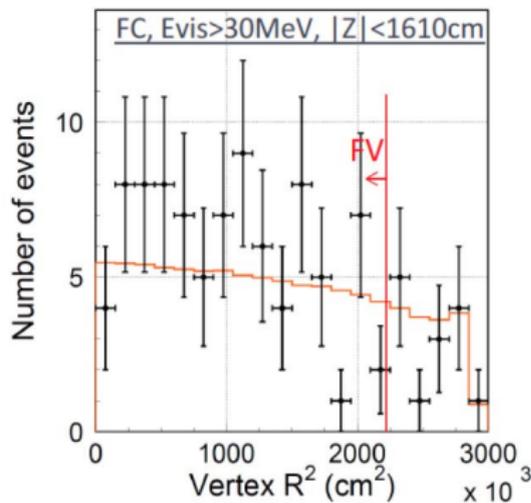
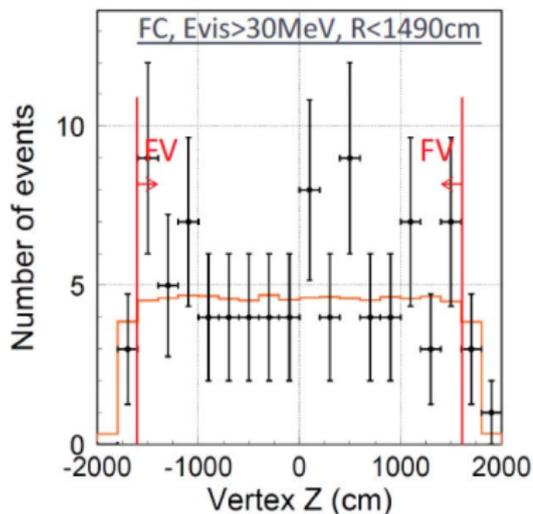


Number of events in on-timing windows ($-2 \sim +10 \mu\text{sec}$)

Class / Beam run	RUN-1	RUN-2	Total	non-beam background
POT ($\times 10^{19}$)	3.23	11.08	14.31	
Step 1: Fully-Contained (FC)	33	88	121	0.023

Sélection de l'échantillon des candidats ν_e

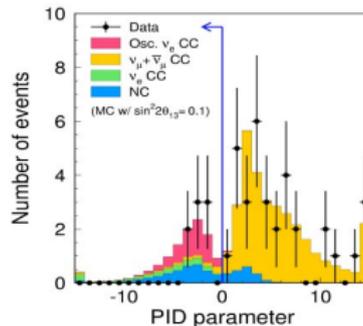
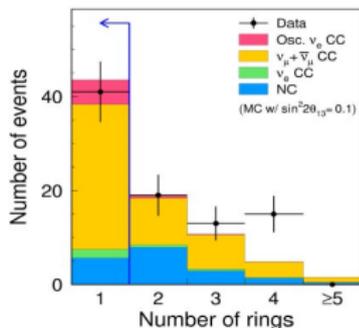
Step 2: Fiducial volume cut: vertex >200 cm from ID wall



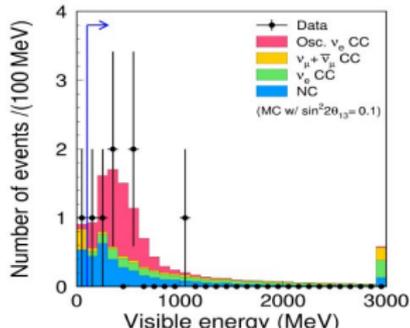
121 \rightarrow 88 Events

Sélection de l'échantillon des candidats ν_e

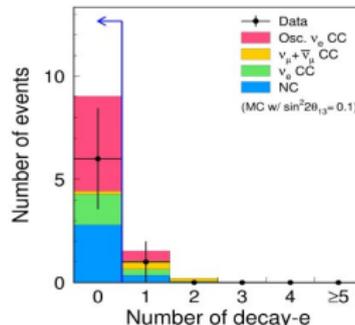
Step 3: Single e-like ring cut
 88 → 8 Events



Step 4: Visible energy cut
 8 → 7 Events

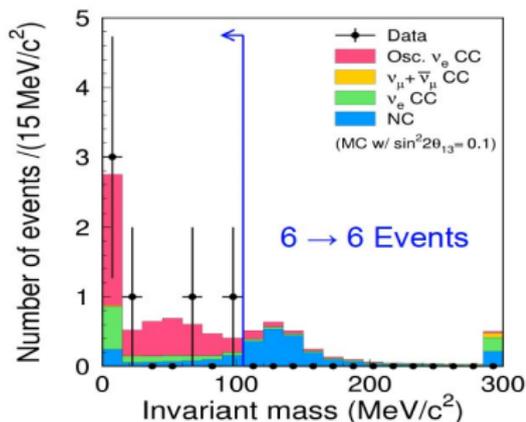


Step 5: Decay electron cut
 7 → 6 Events

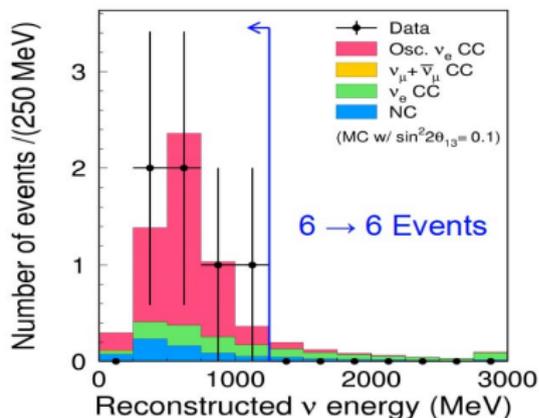


Sélection de l'échantillon des candidats ν_e

Step 6: π^0 Mass Cut



Step 7: Reconstructed Energy Cut



Après sélection des ν_e : **6 candidats** pour un bruit de fond attendu: **1.5 ± 0.3 événements**

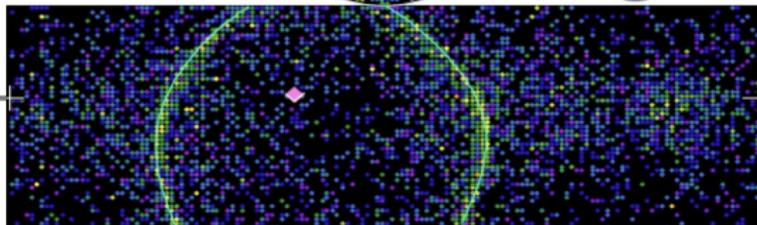
Sélection de l'échantillon des candidats ν_e

Super-Kamiokande IV

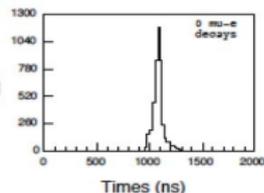
T2K Beam Run 0 Spill 1039222
 Run 67969 Sub 921 Event 218931934
 10-12-22:14:15:18
 T2K beam dt = 1782.6 ns
 Inner: 4804 hits, 9970 pe
 Outer: 4 hits, 3 pe
 Trigger: 0x80000007
 D_wall: 144.2 cm
 e-like, p = 1049.0 MeV/c

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

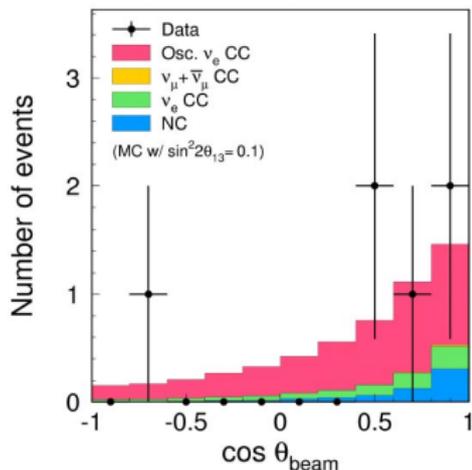


visible energy : 1049 MeV
 # of decay-e : 0
 2γ Inv. mass : 0.04 MeV/c²
 recon. energy : 1120.9 MeV



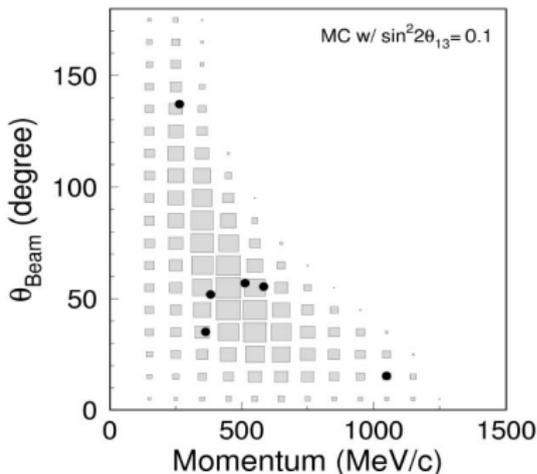
Vérification sur l'échantillon

Reconstructed $\cos(\theta_{\text{beam}})$ in good agreement with expectation:

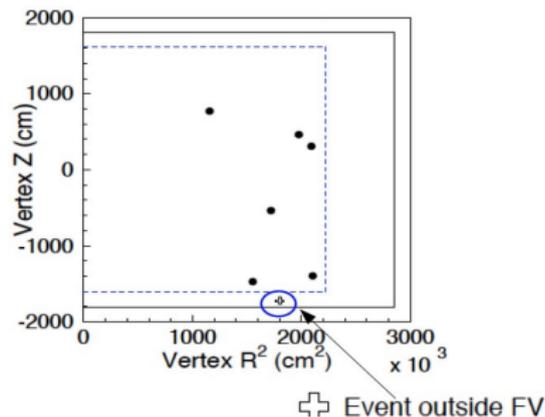
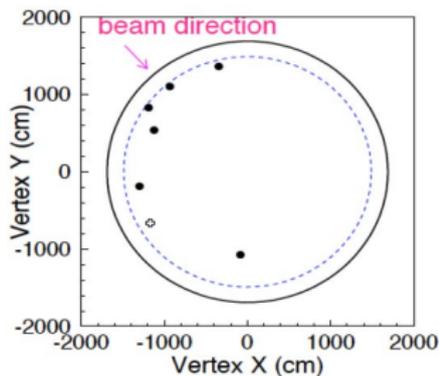


θ_{beam} = Lepton angle relative to beam direction

Reconstructed θ_{beam} vs. lepton momentum in agreement with expectation:



Distribution des vertex

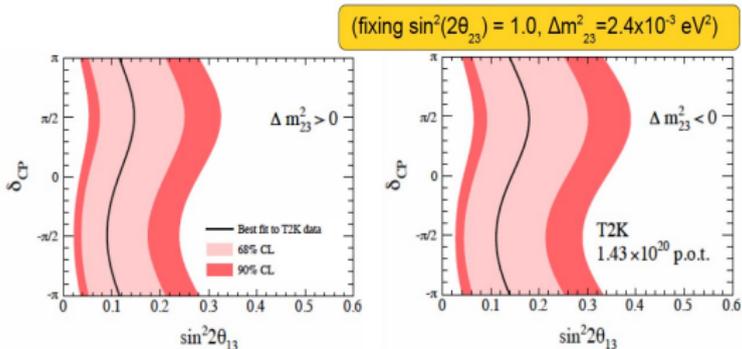


- Test de Kolmogorov-Smirnov sur la distribution en R^2 : $P=0.03$
- Un seul événement hors volume fiduciel [valeur attendue supérieure si bruit de fond corrélé au faisceau]

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

Pour $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ [$\sin^2(2\theta_{23}) = 1.0$ et $|\Delta m_{23}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$]

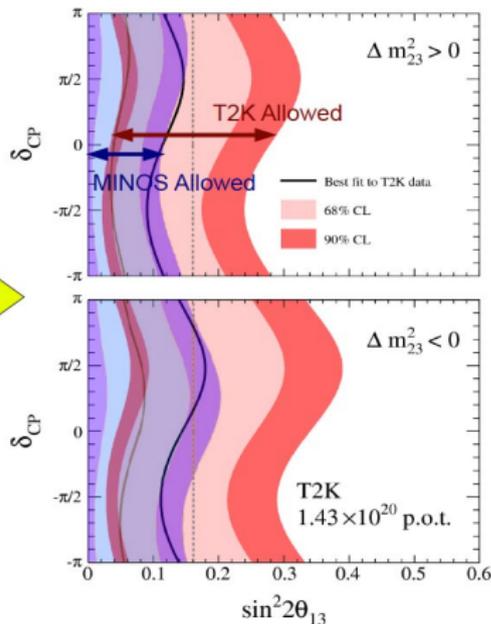
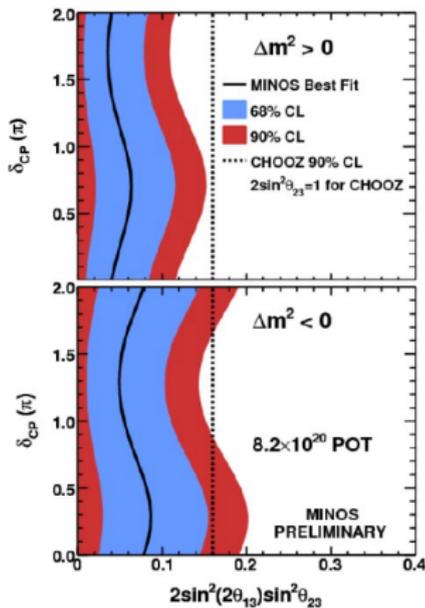
Probabilité d'observer $N \geq 6$ événements = 0.007



- $0.03 < \sin^2(2\theta_{13}) < 0.28$ [90% CL - Hiérarchie normale $\delta = 0$]
- $0.04 < \sin^2(2\theta_{13}) < 0.34$ [90% CL - Hiérarchie inversée $\delta = 0$]

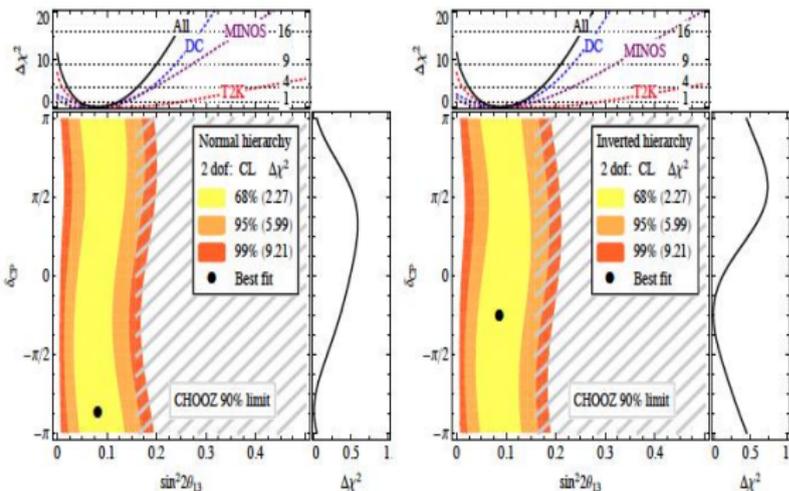
[Abe et al. Indication of neutrino electron appearance from an accelerator produced off-axis - Phys.Rev.Lett. 107 (2011)]

Comparaison avec les résultats de MINOS



Significant overlap of T2K and MINOS 90% C.L. allowed regions

Combinaison T2K, MINOS et Double-CHOOZ



Ajustement global:

- $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.081^{+0.007}_{-0.005}$

$$\delta/\pi = -0.84^{+0.75}_{-0.65}$$

(1 σ) - Hiérarchie normale

- $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.086^{+0.008}_{-0.006}$

$$\delta/\pi = -0.24^{+0.65}_{-0.70}$$

(1 σ) - Hiérarchie inversée

la valeur $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ est exclue à $\sim 3.3 \sigma$

Mélange des saveurs: leptons versus quarks

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

- 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 ces structures (symétries de saveur) à l'échelle électrofaible ?

Plan

- 1 Introduction - Quelle masse pour le neutrino ?
- 2 Oscillations de neutrinos
- 3 Résultats de l'expérience T2K et la quête de l'angle θ_{13}
- 4 Conclusion & Perspectives

Tremblement de terre

Earthquake on Mar. 11th

- Happened at 14:46 on Mar. 11th
 - 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



Tremblement de terre

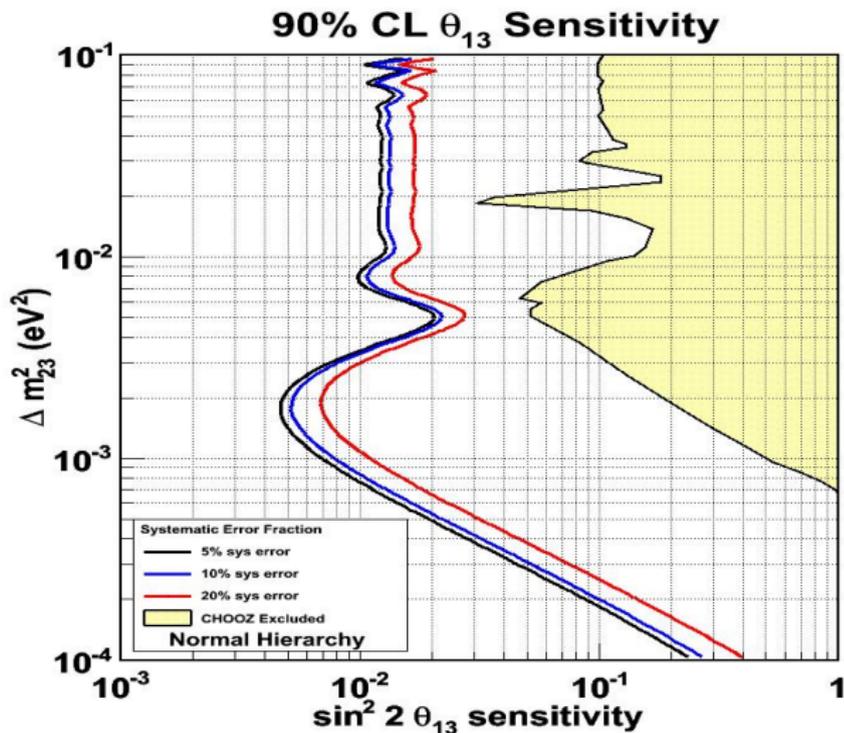
Ground level damages



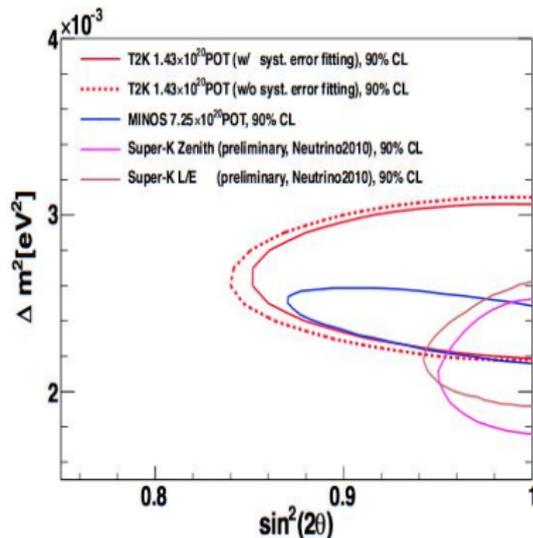
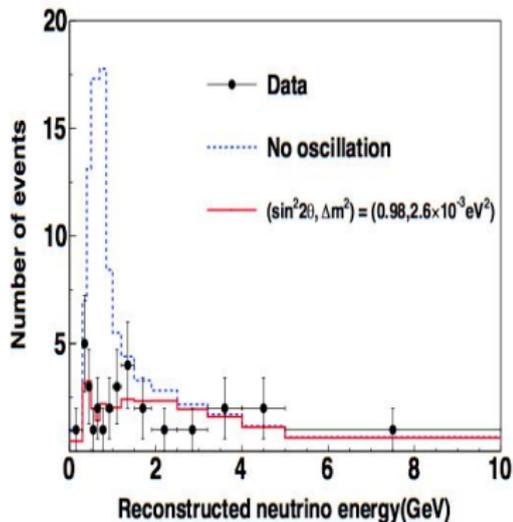
Conclusion & Perspectives

- Résultat de T2K sur les oscillations $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ basé sur la statistique accumulée avant le tremblement de terre (2% de la statistique visée):
 - 6 candidats ν_e observés dans SK [1.5 ± 0.3 attendus dans l'hypothèse $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$]
 - La combinaison de ce résultat avec les dernières mesures de Double-CHOOZ & MINOS exclut $\sin^2(2\theta_{13}) = 0$ à $\sim 3.3\sigma$
- L'analyse de *disparition* de ν_{μ} atteste de valeurs en accord avec les précédentes mesures
- Le laboratoire J-PARC produit à nouveau un faisceau de protons depuis décembre 2011
Redémarrage de T2K prévu début 2012
- Amélioration potentielle de l'analyse passée dans le sillage des futures données

Complément I - Sensibilité de T2K à θ_{13}



Complément II - Analyse en disparition de ν_μ



$$\sin^2 2\theta_{23} > 0.85 \text{ et } \Delta m_{23}^2 \in [2.1, 3.1] \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (90\% C.L.)}$$