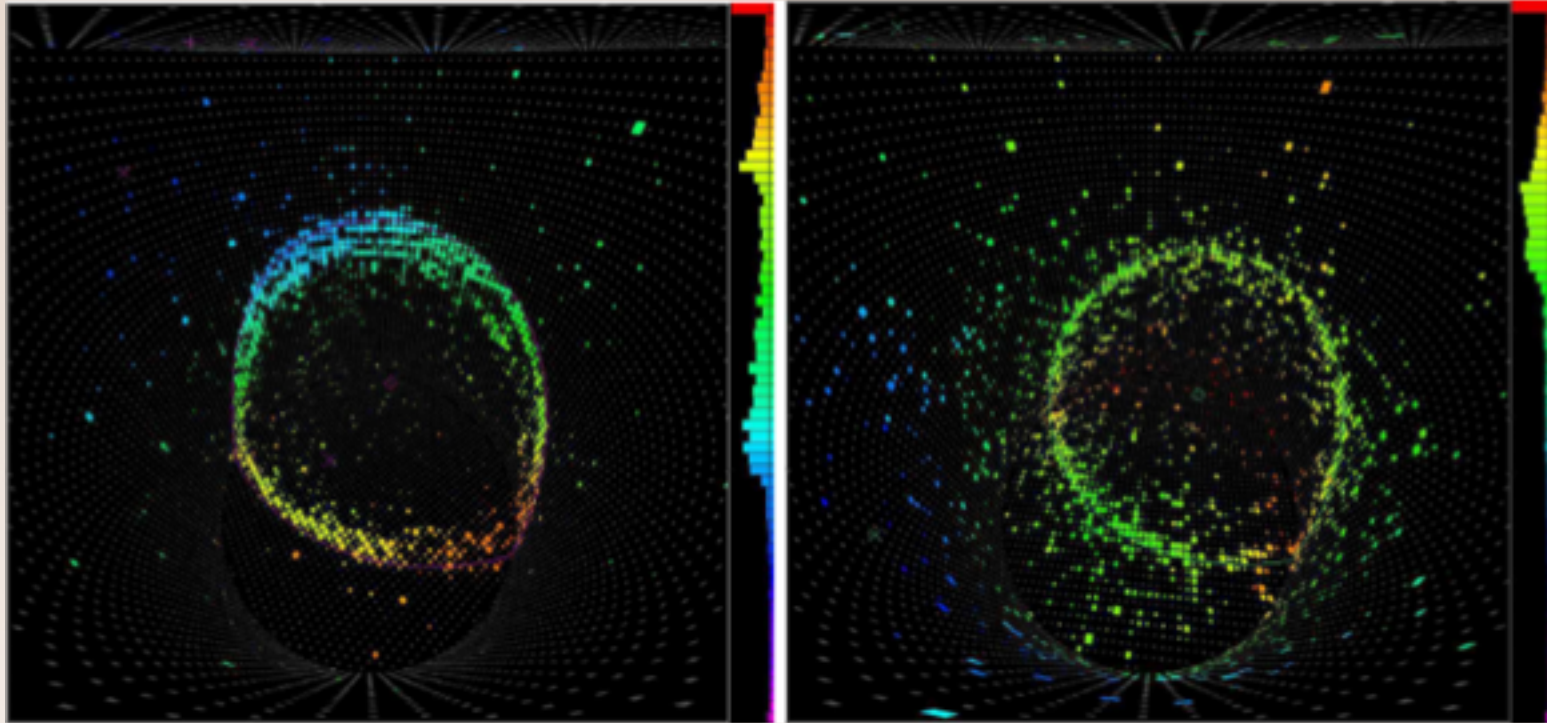


Préparation à une analyse combinée T2K/SK



Stage de M2 NPAC
Année 2019-2020
Lucile MELLET

Encadrant: Mathieu Guigue

Sommaire

- **Les neutrinos**
- **Les expériences T2K et SK**
- **Une analyse combinée: motivations**
- **La méthode d'analyse**
- **Génération des données SK**
- **Résultats de l'analyse**
- **Conclusions et Perspectives : Hyper-Kamiokande**

Les neutrinos

- Interaction faible
- $m_\beta \leq 1.1 \text{ eV} , 90\% \text{C.L.}$

- États de saveur $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$
- États de masse $\nu_1 \nu_2 \nu_3$

$$\left. \begin{array}{l} \text{États de saveur } \nu_e \nu_\mu \nu_\tau \\ \text{États de masse } \nu_1 \nu_2 \nu_3 \end{array} \right\} |\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}s_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}^P$$

- Effets de matières: potentiel dépendant de la saveur et de N_e

→ Asymétrie $\nu / \bar{\nu}$

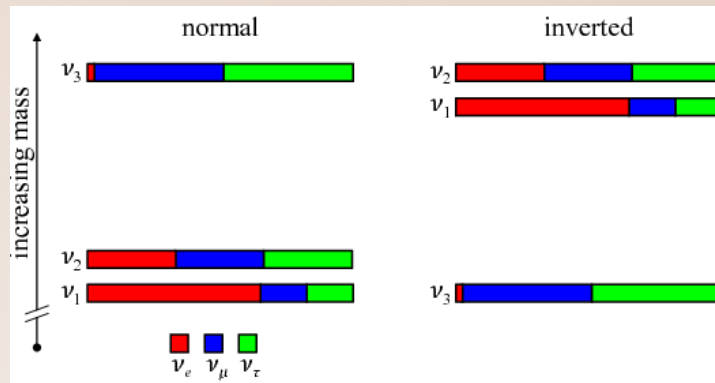
$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq & \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 \\ & + \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31} \frac{\sin(aL)}{(aL)} \Delta_{21} \cos(\Delta_{31} + \delta_{CP}) \\ & + \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \Delta_{21}^2, \end{aligned}$$

Ordre 1 , densité constante

$$\Delta_{ij} = \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \quad \text{et } a = G_F N_e / \sqrt{2}$$

Questions ouvertes sur les propriétés des neutrinos

- Nature Dirac/Majorana
- Hiérarchie de masse



- Contraintes des paramètres d'oscillation

$\sin \theta_{13}$	$\sin \theta_{23}$	Δm_{23}	Δm_{12}
✓ Réacteur	✗	✗	✓ Solaire

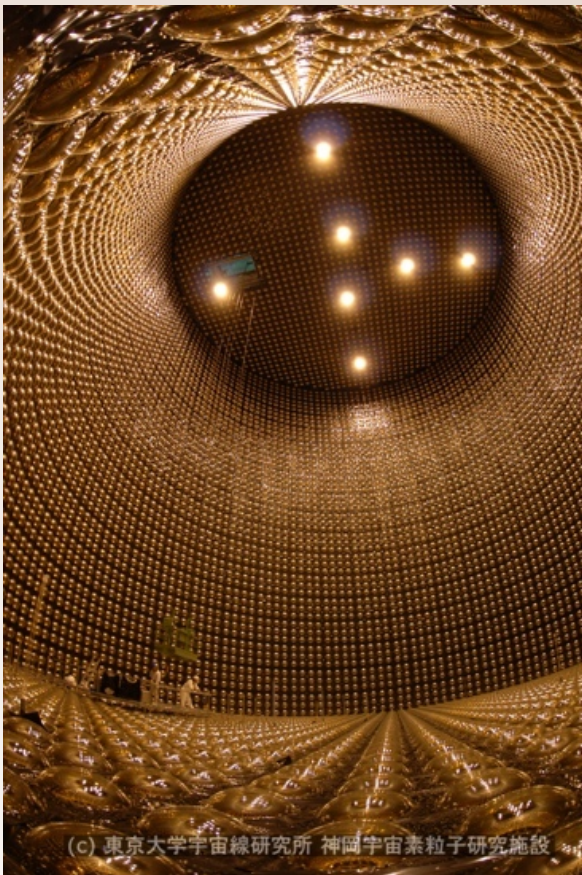
- Violation de CP : $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \xrightarrow{\text{CP}} P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$
 $\rightarrow$ Asymétrie $\nu/\bar{\nu}$



Les expériences T2K et SK

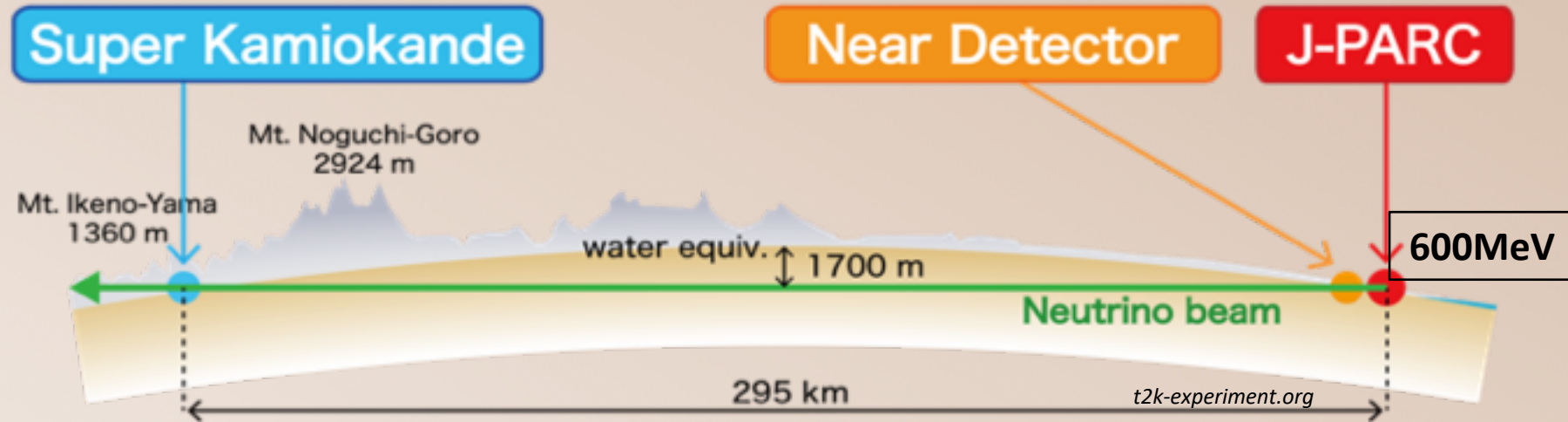
Super-Kamiokande (1996), Mine Mozumi (1000m), Kamioka, Japon

Tokai to Kamioka (2010)

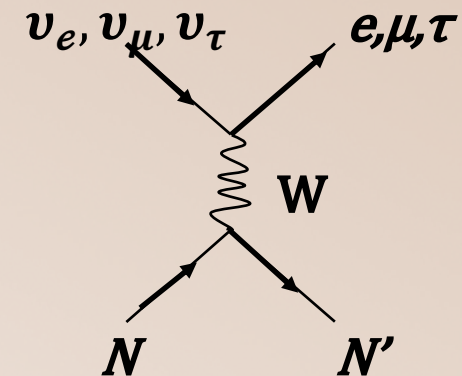


22/06/2020

t2k-experiment.org



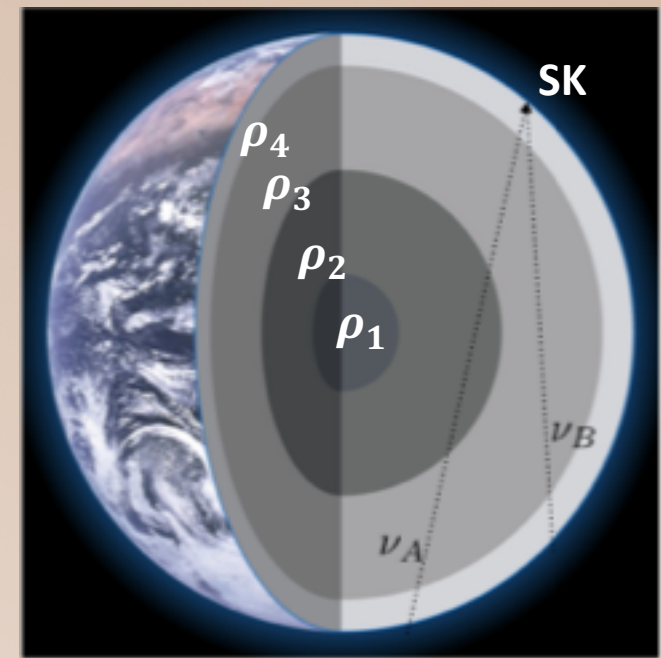
- Faisceau, deux modes ν_μ et $\bar{\nu}_\mu$
- Détection de la lumière Cherenkov
 - 50 kTonnes d'eau
 - 11000 tubes photo-multiplicateurs (PMT)
- Mesurables: saveur, énergie du lepton, angle lepton/ ν



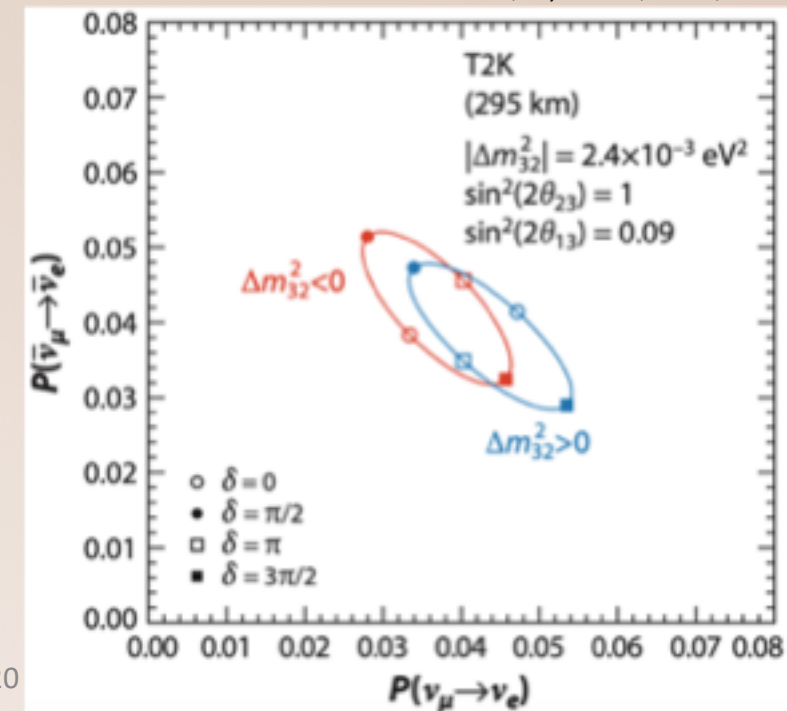
Une analyse combinée

Une analyse combinée SK (**atmosphérique**)/T2K (**faisceau**)

- Complémentarité des deux expériences : levée de dégénérescence dans les mesures (mêmes observables, ex: asymétrie $\nu/\bar{\nu}$)
 - Distances parcourues : 10-13000km 295km
 - Densités traversées : $\rho_1 = 13 \text{ g.cm}^{-3}$ à $\rho_4 = 3 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Effets de matière
 - Énergies : 100MeV à 100GeV 600MeV
- Même détecteur lointain



K. Abe et al., Phys. Rev. D, vol. 97,2018

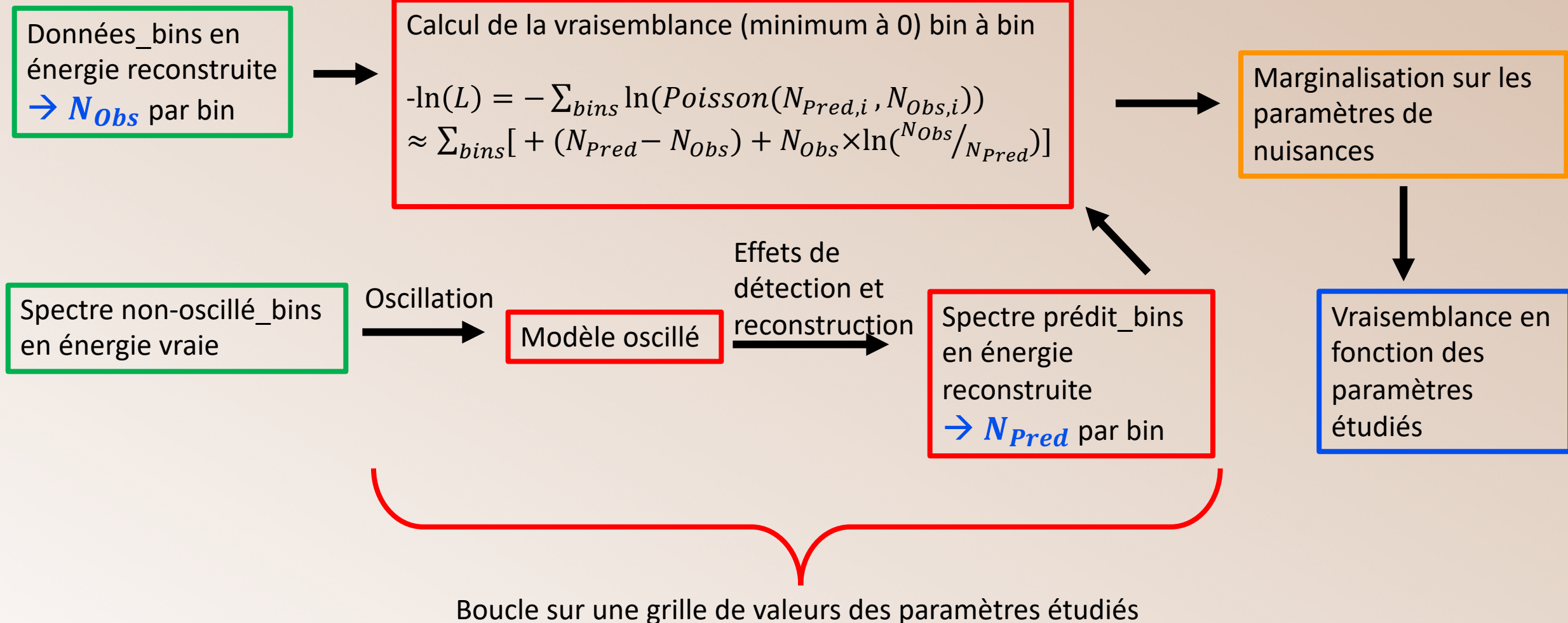


R. B. Patterson, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., vol. 65, . 2015

valeurs vraies non-connues
des paramètres d'oscillation

La méthode d'analyse

Collaboration T2K, groupe
d'analyse P-Theta, C++



Approche générale

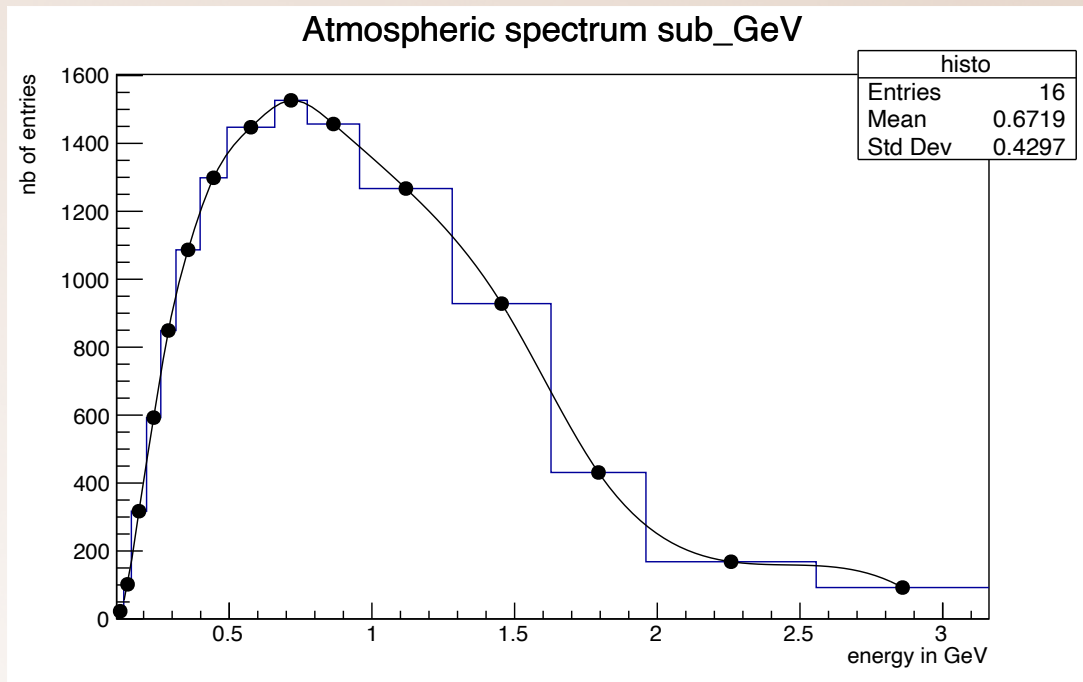
Objectif : familiarisation avec les méthodes et outils d'analyse de la collaboration, acquisition d'une vue d'ensemble du contexte et de l'analyse

Étapes :

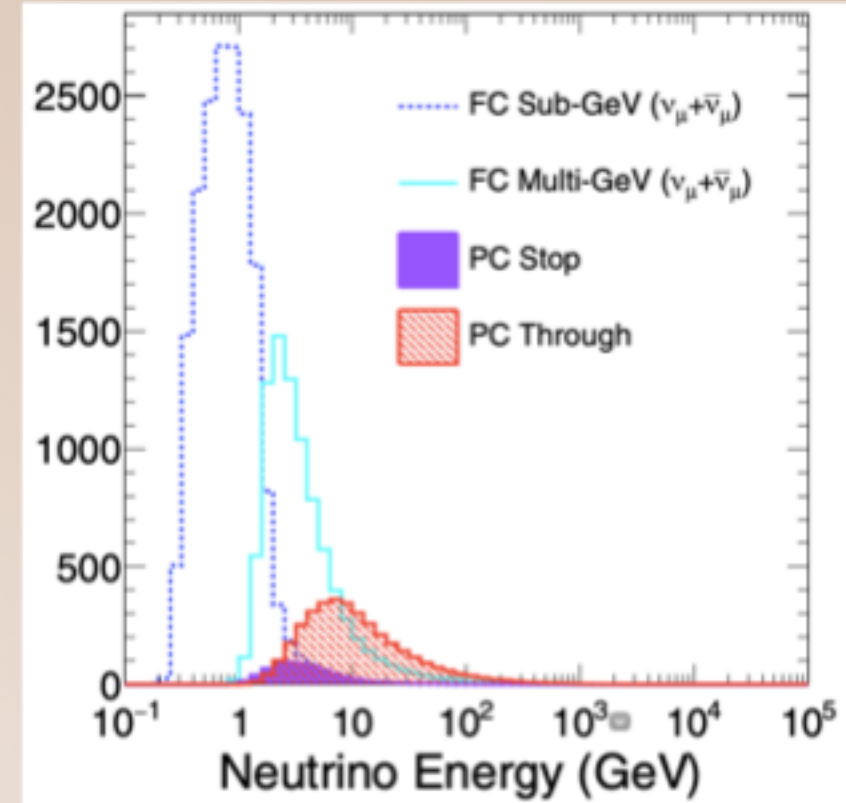
1. Générer des spectres de neutrinos atmosphériques (simplifications)
2. Création du modèle (PDF)
3. Adaptation du logiciel aux spécificités de ce type de données
4. Validation des fausses données par un calcul indépendant
5. Combinaison avec les données T2K
 - Sorte de « preuve de concept »

Génération des fausses données SK

- Digitalisation de spectres non-oscillés publiés par la collaboration SK
- Histogramme 1 point par bin
- Extrapolation cubique entre les bins -> fonction continue



- Longueur et densité de T2K
- Sub-GeV
- CCQE
- ν_μ

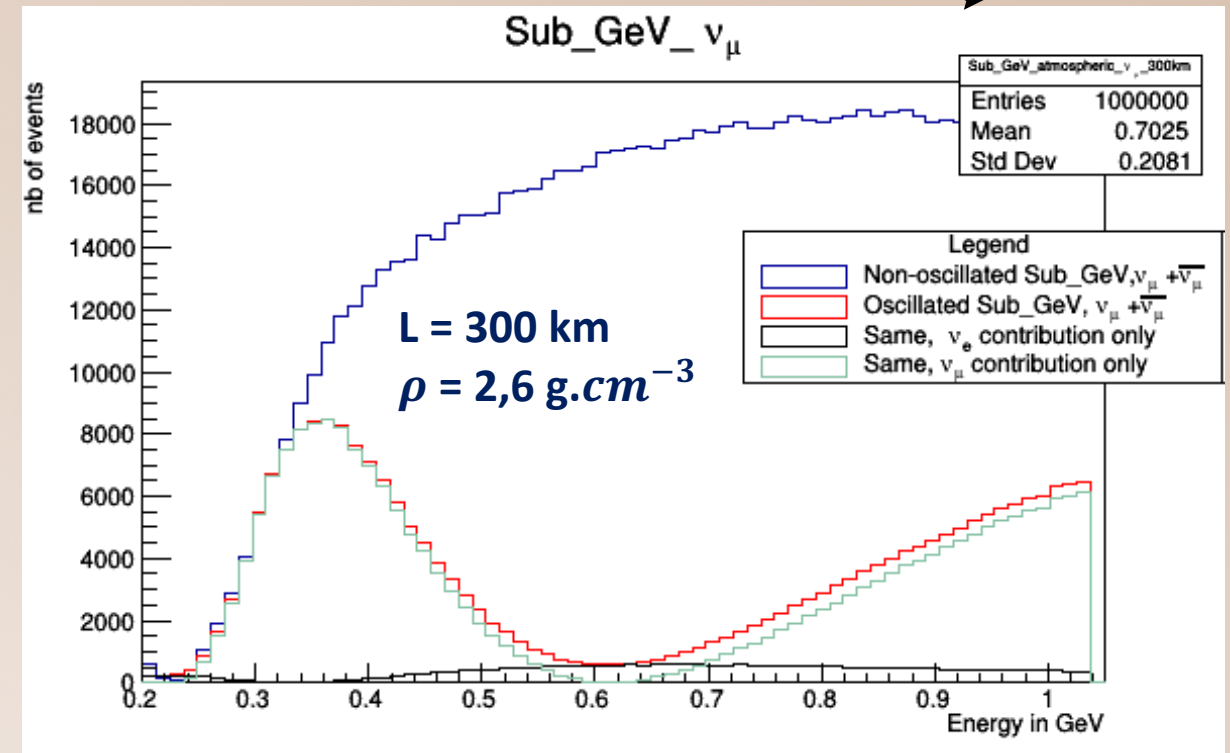


K. Abe et al., Phys. Rev. D, vol. 97, 2018

Génération des fausses données SK

Nb : pour illustration uniquement

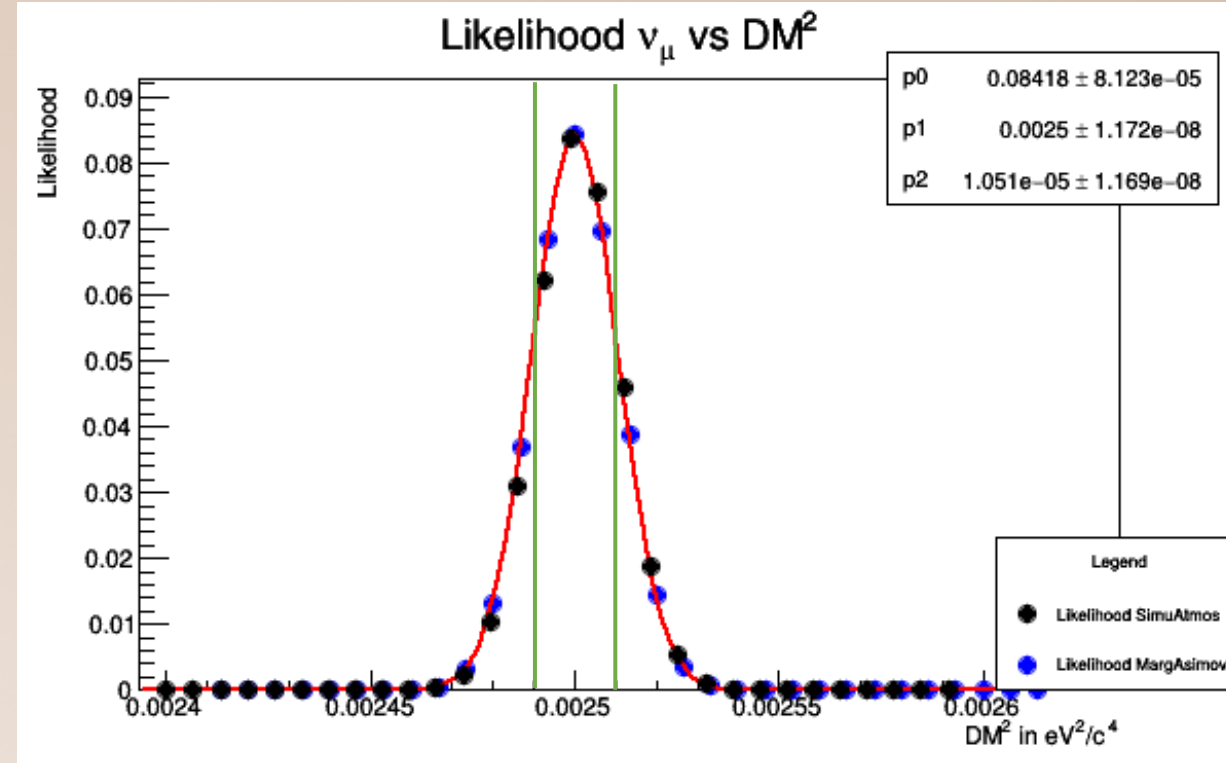
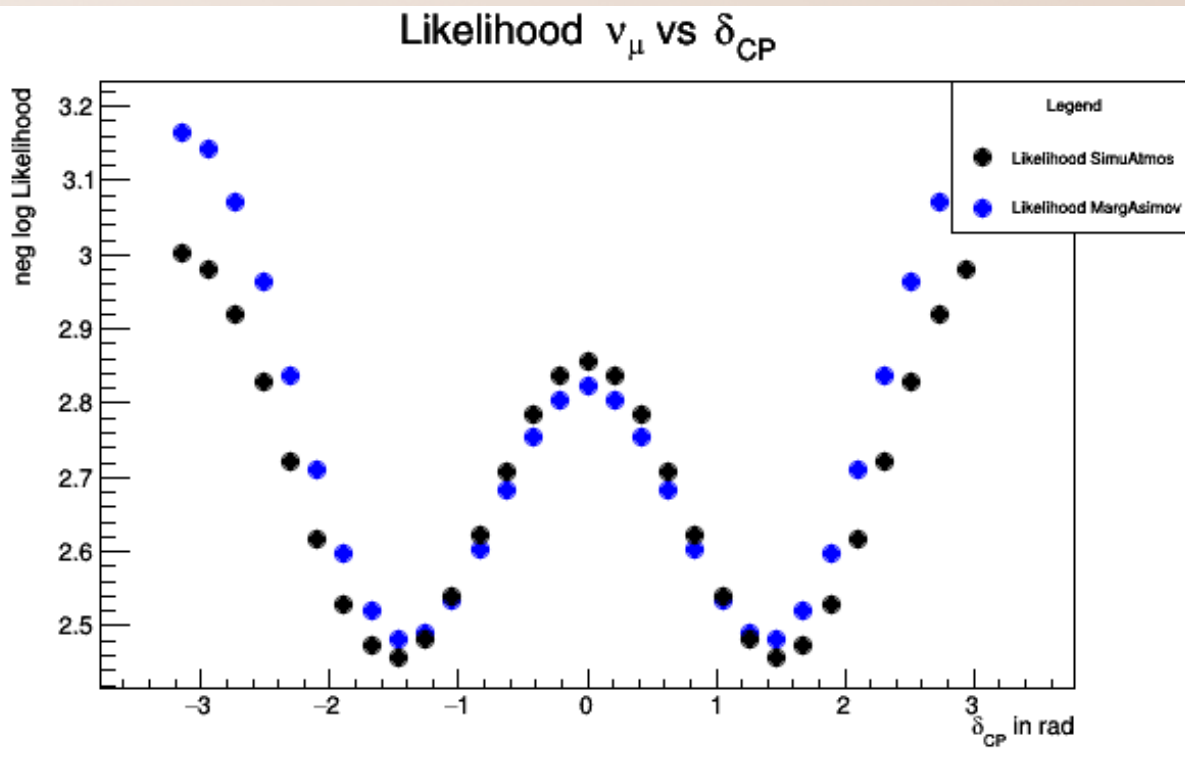
- Tirage aléatoire
 - Binning de T2K
 - Proportion ν_μ / ν_e conservée
 - Nb $\nu_\mu = 15000$ (5000 jours de prise de données SK) → « données »
 - Nb $\nu_\mu = 2$ millions puis renormalisation → « modèle »
- Oscillation des « données » avec ModProb3++ (T2K)
 - Valeurs du PDG 2018



$$Spectre_{oscillé, \nu_\mu} = Spectre_{\nu_\mu} * P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) + Spectre_{\nu_e} * P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$$

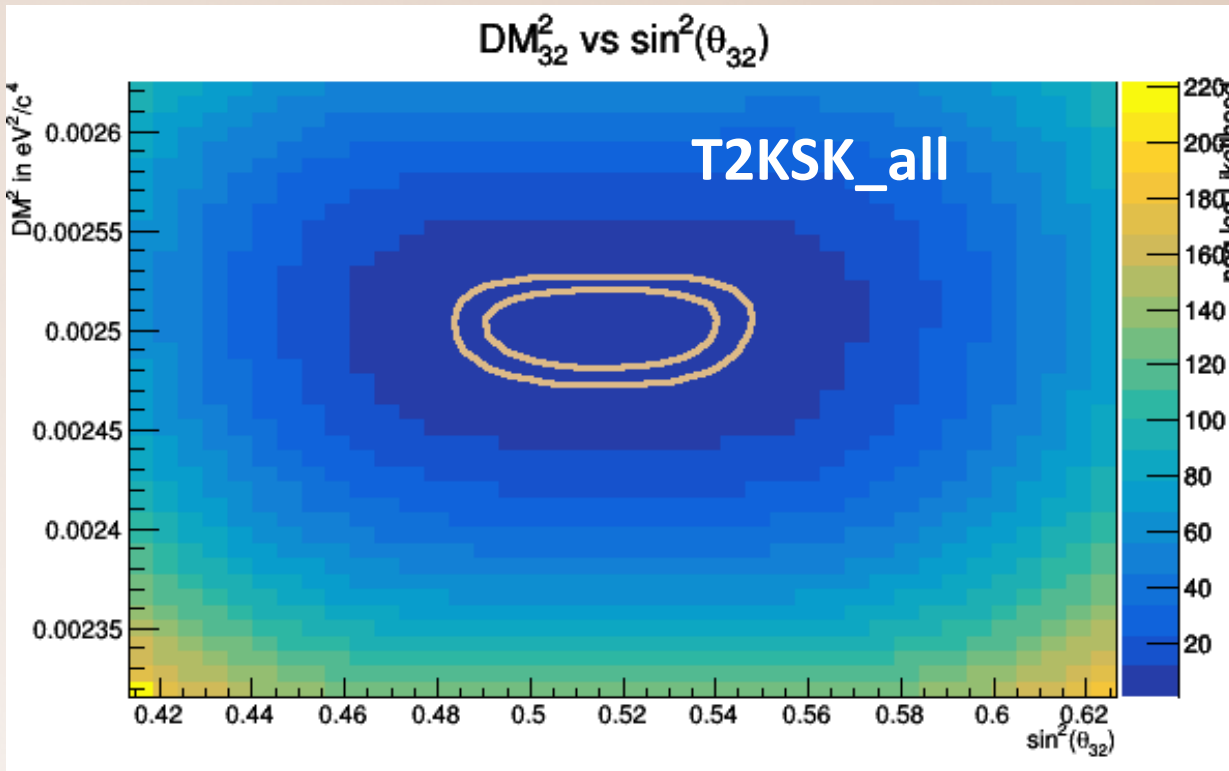
Validation

- **Adaptation du logiciel P-theta**
 - Sans paramètre systématique
 - Binning, modèle non-oscillé, fichiers de configuration ...



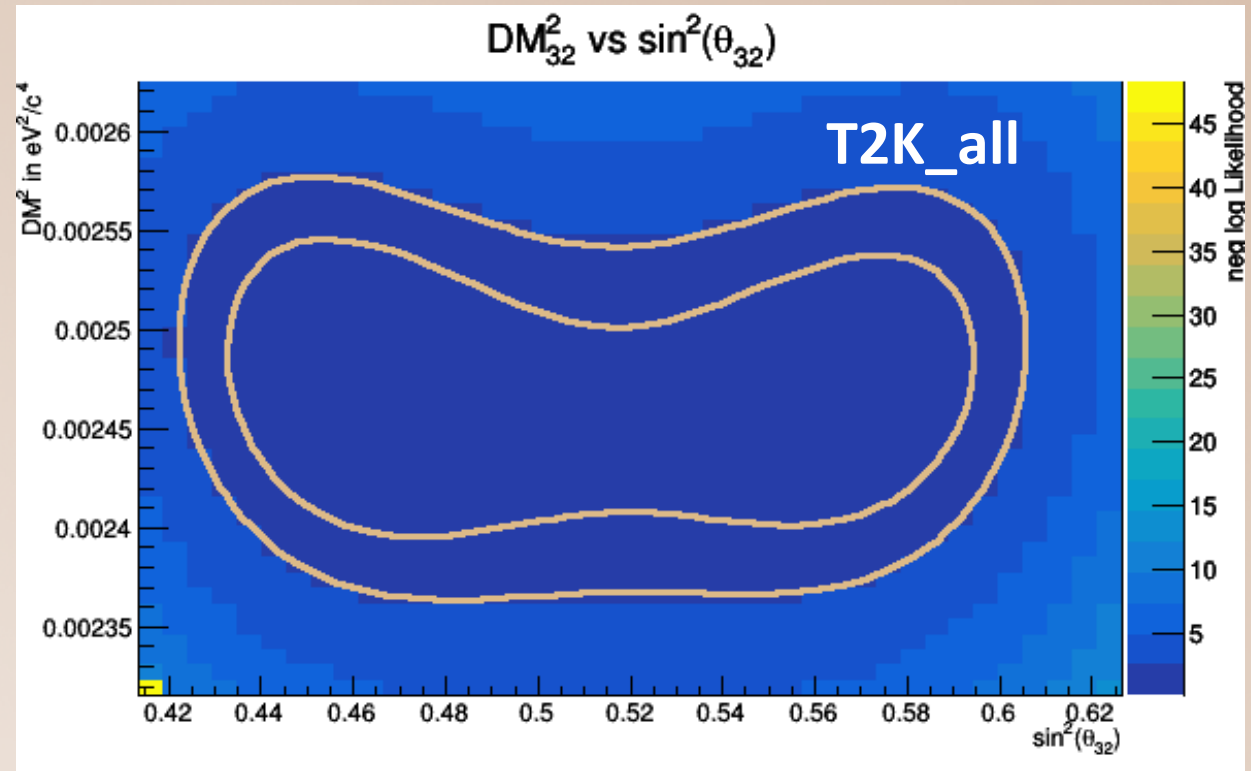
- **Première analyse des « données » générées**
 - Validation des fausses données et de la méthode
 - Paramètres fixés, distance et densité T2K, NH

Résultats de l'analyse



15000 ν_μ

Effets statistiques

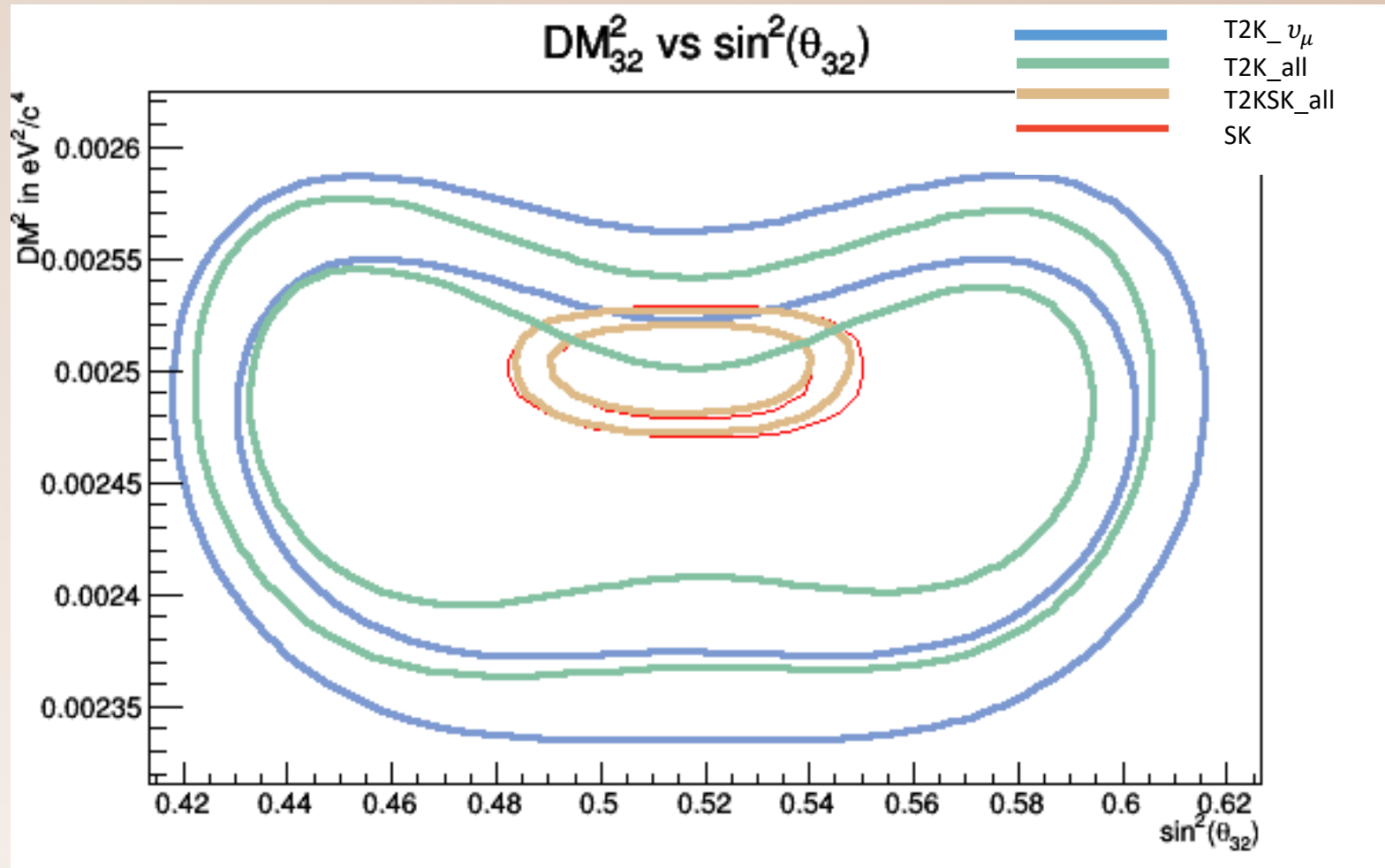


318 ν_μ

Effets du spectre en énergie

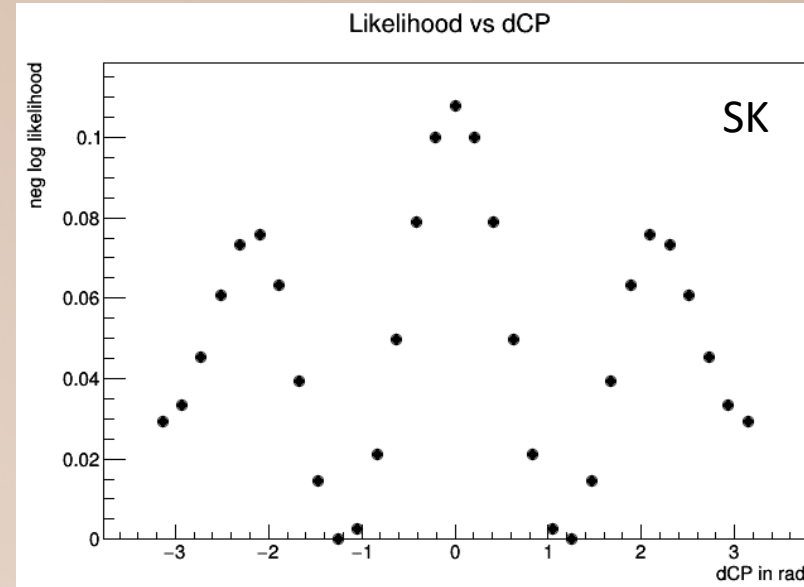
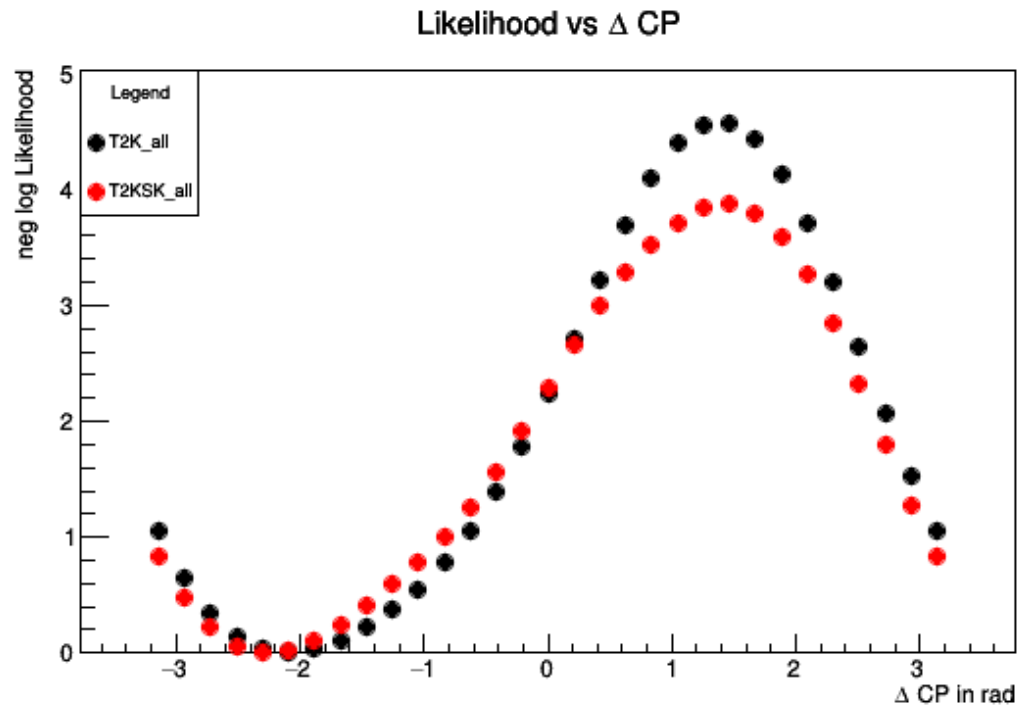
Contours à 68% et 90% de confiance

Résultats de l'analyse



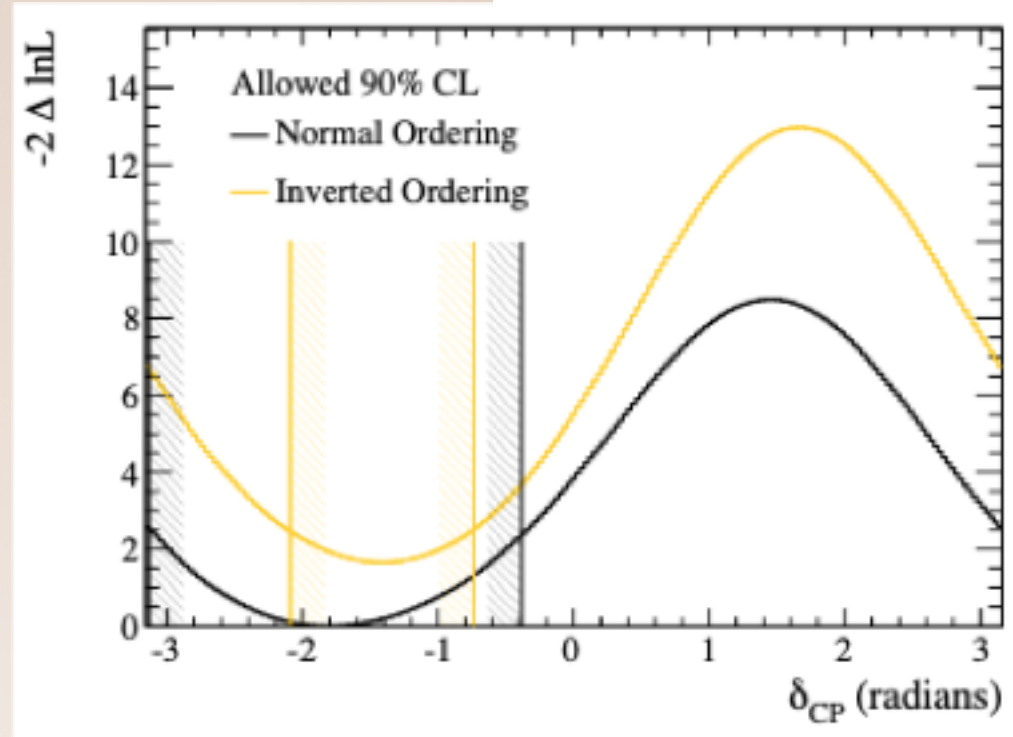
Décalage : valeurs du PDG 2018 vs run1-10 T2K

Résultats de l'analyse

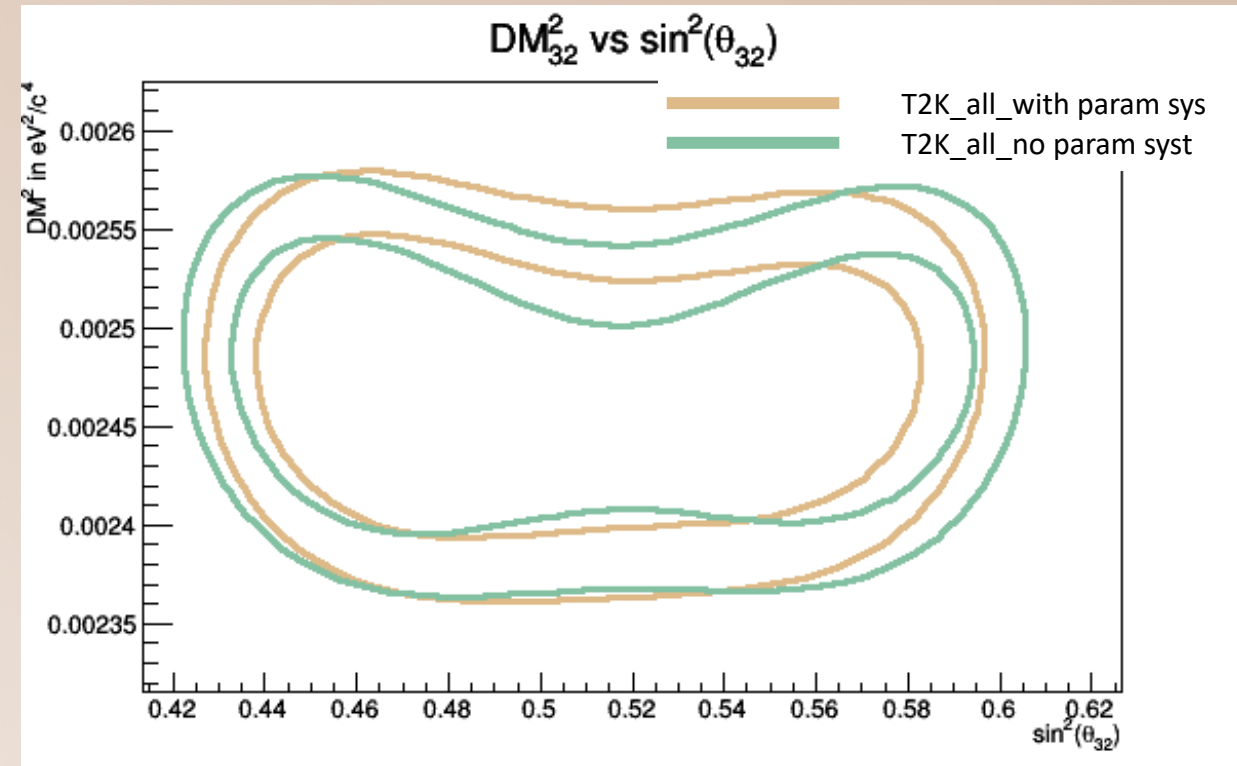
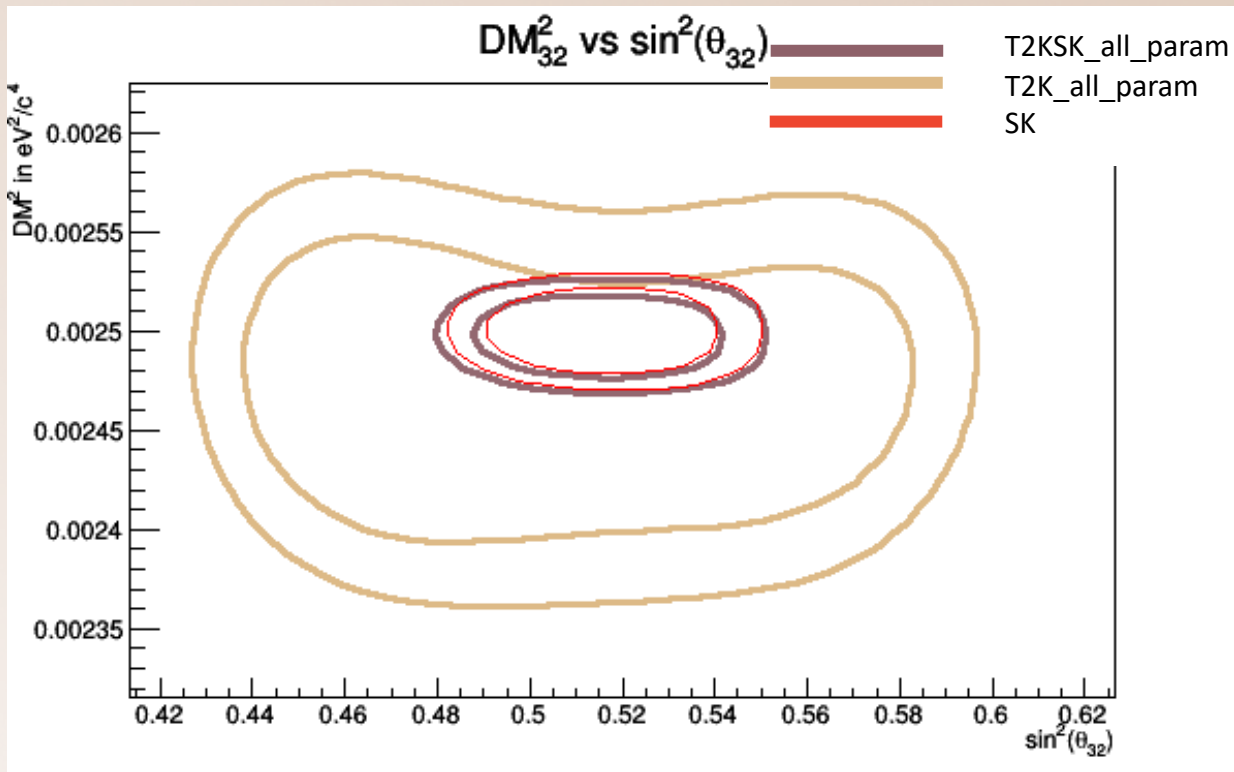


Étude δCP

SK: ν_μ seulement (ici) $\rightarrow$ pas de sensibilité au signe



Résultats de l'analyse



Effet des paramètres systématiques

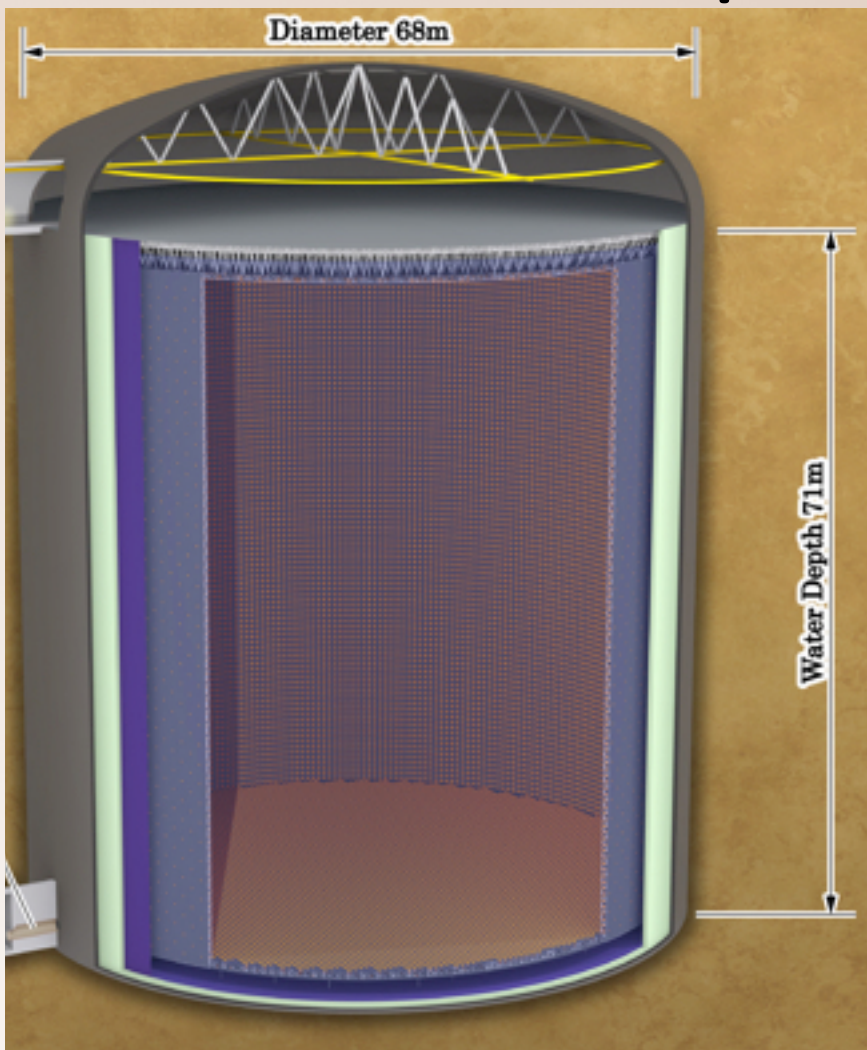
Conclusion de l'analyse

Première approche
Approximations/simplifications

Pas de conclusion sur la sensibilité d'une telle étude

Mais : « preuve » de faisabilité + travail de préparation
Effet statistique

Perspectives: Hyper-Kamiokande



(c) Hyper-Kamiokande Collaboration

- Cuve 5 fois plus grande
 - Précision et synchronisation d'horloges, PMT et multi-PMT (uniformément)
 - Une seule collaboration internationale
 - δ_{CP} , Supernovae, ...
- **Sujet de thèse: Préparation à l'expérience Hyper-Kamiokande**
- R&D: horloges, PMT
 - Études de sensibilité
 - Analyse combinée

Conclusion

- **Familiarisation**
 - Les différentes étapes d'analyse et les codes
 - Travail au sein d'une collaboration internationale
- **Première implémentation des spécificités d'un échantillon de neutrinos atmosphériques**
- **Préparation à l'analyse combinée**
 - Continuité en thèse

Merci de votre attention !

Slides complémentaires

Les neutrinos_complément

$$P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \Re[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i}] \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ji}^2 L}{4E} \right) + 2 \sum_{i < j} \Im[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i}] \sin \left(\frac{\Delta m_{ji}^2 L}{2E} \right)$$

Etc..

