

Préparation à l'expérience Hyper-Kamiokande pour des mesures précises des paramètres d'oscillation des neutrinos



Encadrement : Mathieu Guigue et Boris Popov



Début de la thèse : 01 octobre 2020
Comité de suivi de thèse n°1 : 03 mai 2021



Plan de la présentation

- ▶ Contexte : Physique des neutrinos
- ▶ L'expérience T2K
- ▶ Méthode d'analyse T2K (P-theta)
- ▶ Analyse combinée T2K/SK
- ▶ Estimation des erreurs systématiques de détection avec un MCMC
- ▶ Contribution à l'analyse d'oscillation 2021 (T2K)
- ▶ Vers Hyper-Kamiokande
- ▶ Intégration de mon sujet dans le groupe et les collaborations
- ▶ Formations et écoles
- ▶ Conclusion / perspectives

Résumé de la physique des neutrinos

- États de saveur $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$
 - États de masse $\nu_1 \nu_2 \nu_3$
- $$\left. \begin{array}{l} \nu_e \nu_\mu \nu_\tau \\ \nu_1 \nu_2 \nu_3 \end{array} \right\} | \nu_\alpha \rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* | \nu_i \rangle$$

Probabilité d'oscillation ou de non oscillation \rightarrow Observable = le nombre de neutrinos d'une certaine saveur et énergie

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}s_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} P$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2\theta_{32} \sin^2 2\theta_{31} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right)$$

(pour $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{31}^2 \approx \Delta m_{32}^2$ et $\frac{\Delta m_{12}^2 L}{E} \ll 1$)

+ Asymétrie $\nu/\bar{\nu}$ (effets de matière)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \propto \sin(\delta_{CP})$$

Questions ouvertes :

- Dirac/Majorana

- Masses absolues

~ Hiérarchie de masse

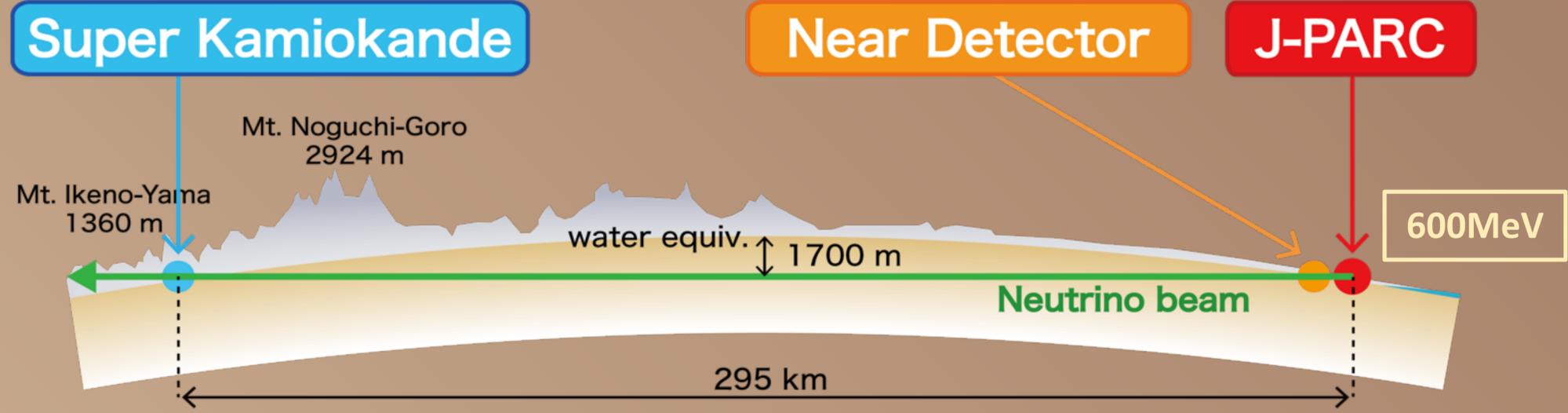
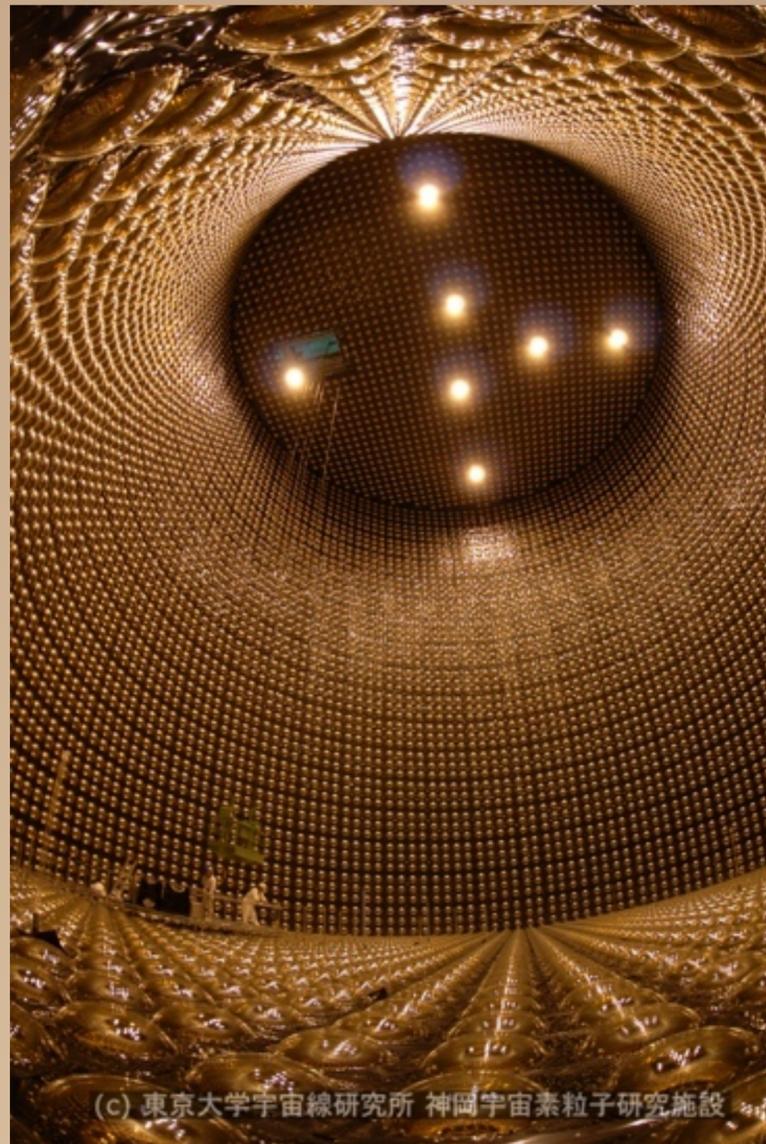
- $\sin(\theta_{13})$ et Δm_{12}^2

✓ $\sin(\theta_{23})$ et Δm_{23}^2

✓ δ_{CP}

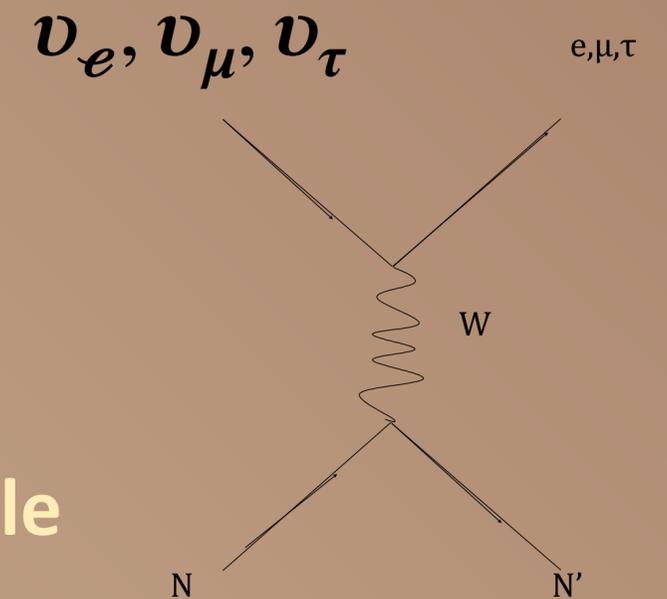
Tokai to Kamioka (T2K)

Super-Kamiokande (1996), Mine Mozumi (1000m), Kamioka, Japon
Tokai to Kamioka (2010)



- 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



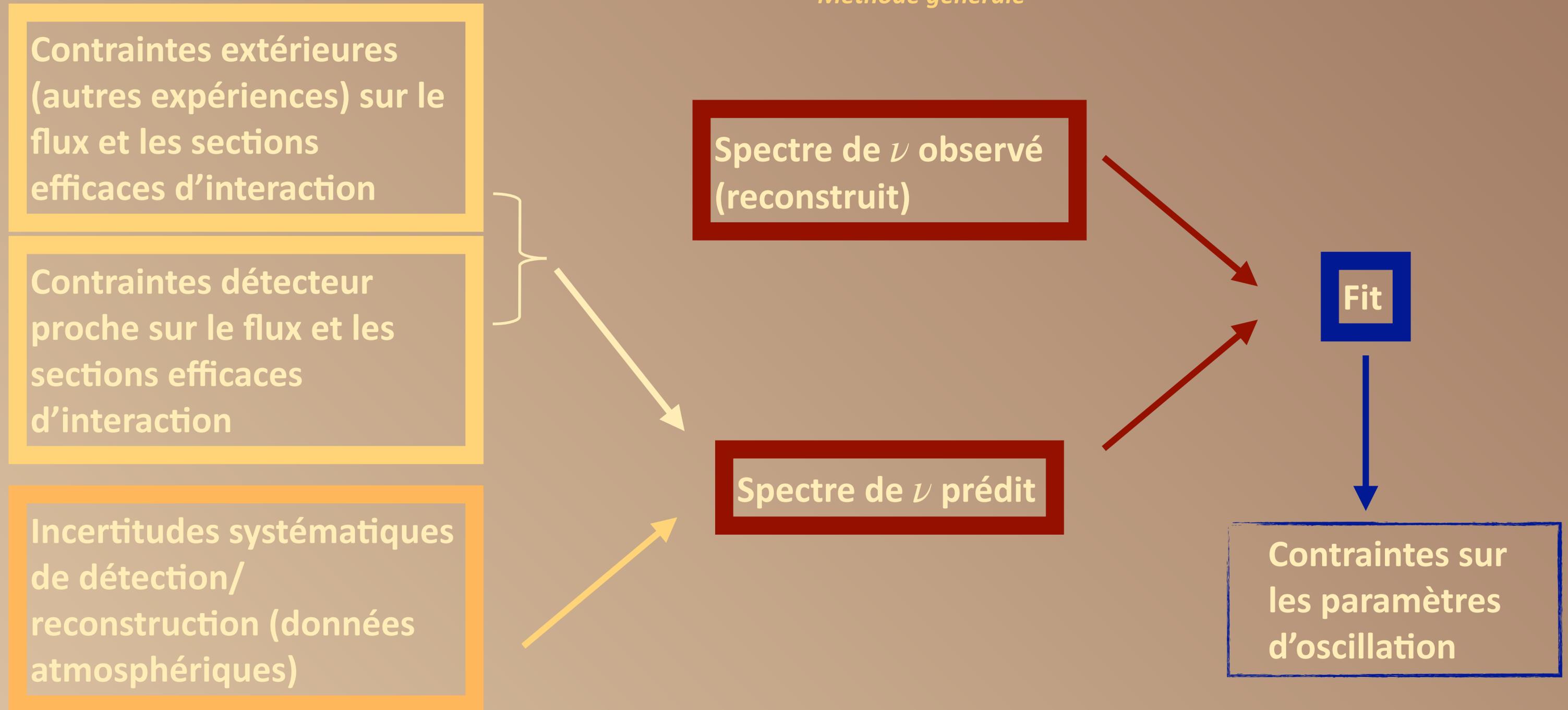
39 m

t2k-experiment.org

(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

Méthode d'analyse dans le groupe P-theta

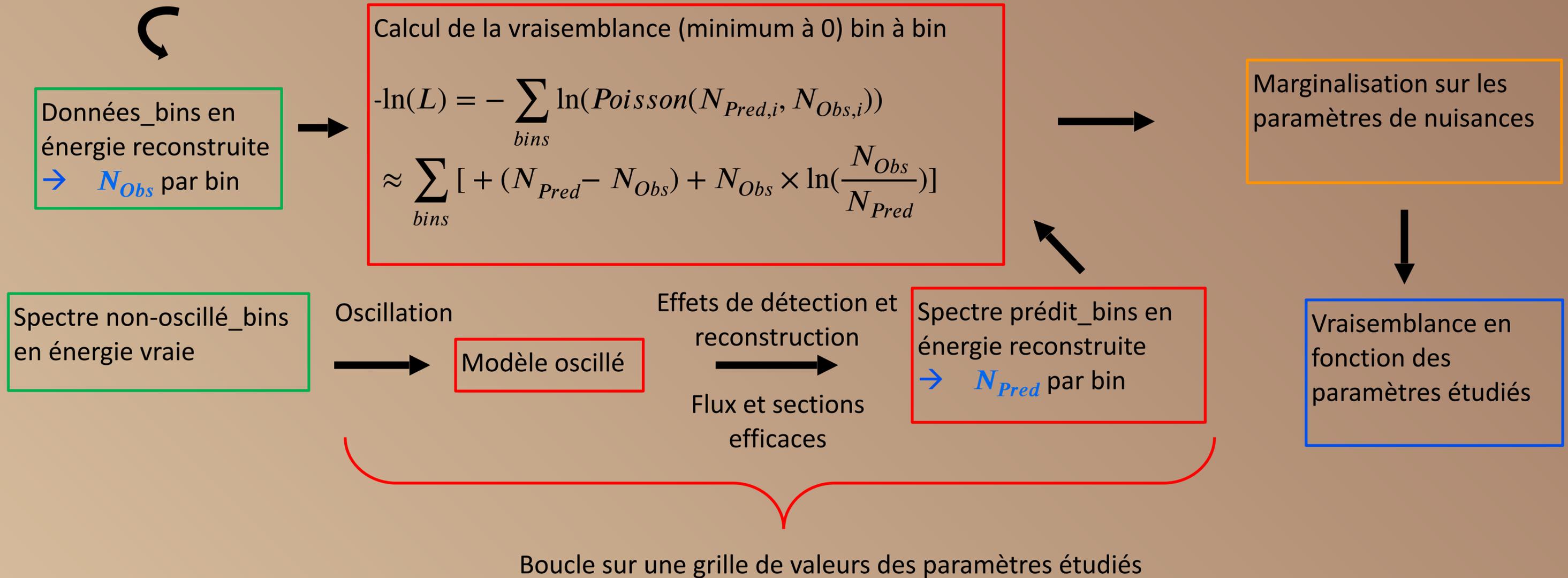
Méthode générale



Méthode d'analyse dans le groupe P-theta

valeurs vraies non-connues
des paramètres d'oscillation

Logiciel/groupe P-theta : 1 des 3 groupes d'analyse de T2K



Contribution à l'analyse d'oscillation 2021

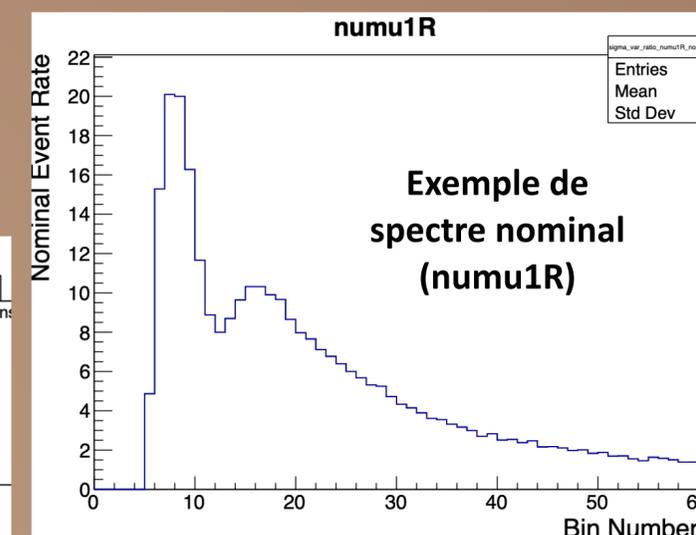
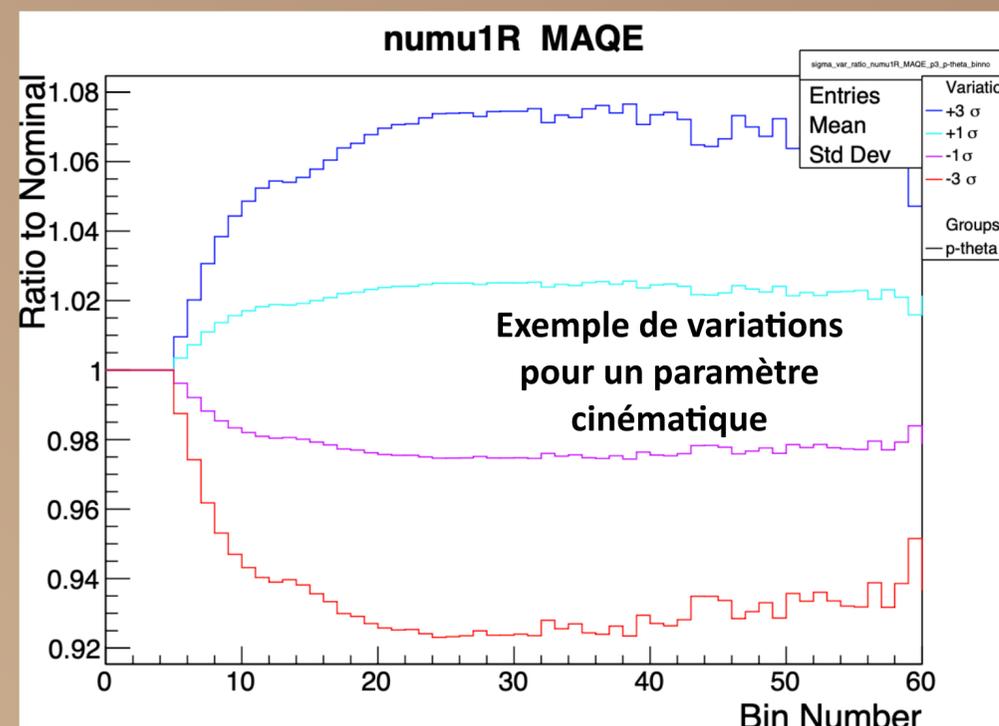
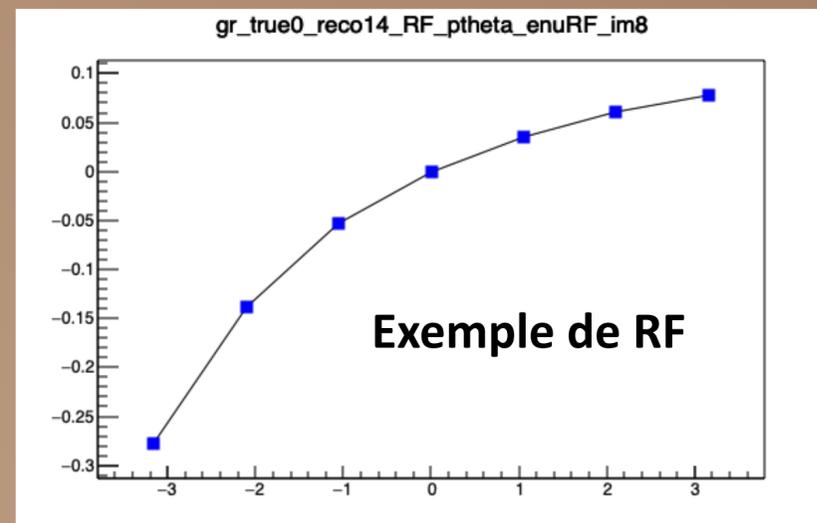
Nouveaux paramètres systématiques d'interaction (sections efficaces et énergie de liaison) venant de nouveaux modèles/nouvelles études à implémenter dans le logiciel P-theta → sur lesquels on marginalisera la vraisemblance

Données sous forme de « poids » par bin d'énergie à $\pm 1,2$ ou 3 sigmas

→ intégrer dans notre analyse en produisant les

- « fonctions de réponse » : poids (%) de l'évènement à $\pm 1,2$ ou 3 sigmas de la valeur nominale du paramètre, différent pour chaque bin en énergie vraie, reconstruite et type d'interaction(8) et type de ν
- Spectres attendus par type d'interaction
- Ratios des spectres par bin d'énergie reconstruite au nominal pour les $\pm 1,2$ ou 3 sigmas pour chaque paramètre

→ Valider par comparaison avec les autres groupes et étudier l'impact sur l'analyse (contours δ_{CP} par ex)

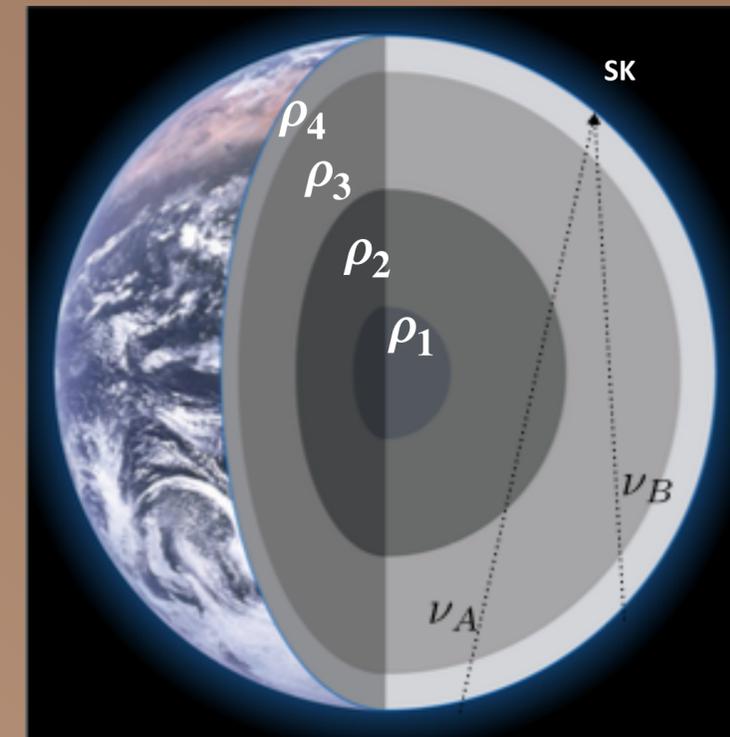


Une analyse combinée

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

Au sein du groupe P-theta (méthode présentée précédemment)

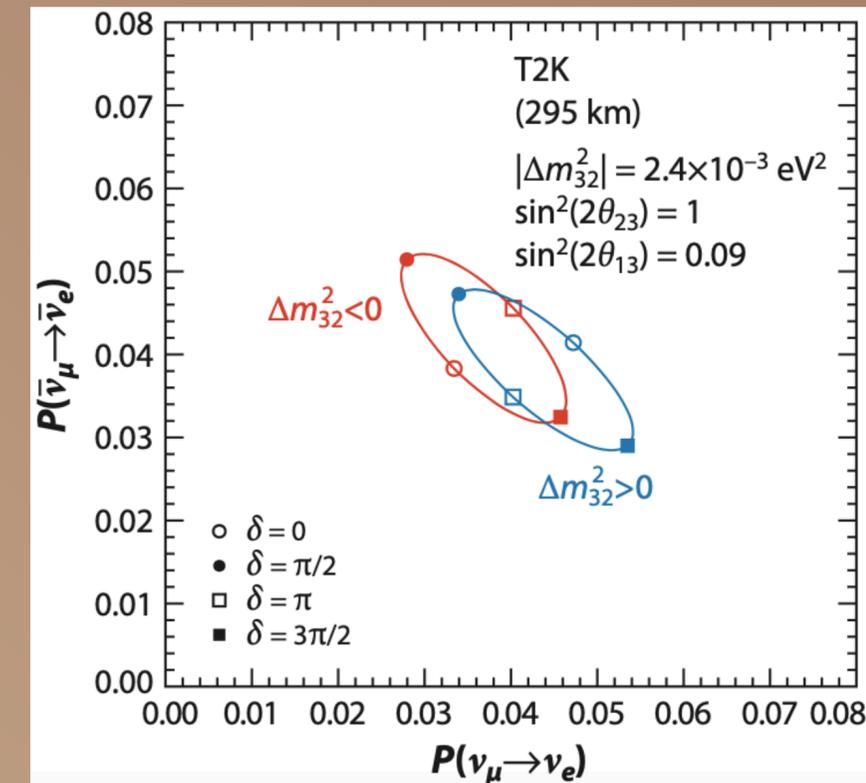
Perspective : Hyper-Kamiokande



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

Complémentarité des 2 sources de neutrinos

	ν atmosphériques	ν du faisceau de T2K
Distances	10-13000km	295km
Densités → Effets de matière	$\rho_1 = 13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ à $\rho_4 = 3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\rho = 2,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Énergies	100MeV à 100GeV	600MeV



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

→ Estimation cohérente des incertitudes systématiques de détection entre les deux expériences

Estimation des incertitudes systématiques de détection

Méthode S T2K : - position/direction: un échantillon indépendant de l'analyse (muons cosmiques), différence entre MC/données → 2 cas extrêmes

- e- (désintégration du muon): études de sélection
- PID, nb d'anneaux: MCMC sur les vraisemblances

Méthode SK : MCMC sur les vraisemblances (coupures)

SK/T2K combinée (court terme) : Combinaison a posteriori des différents inputs

Principe de mon travail: essayer de créer une méthode unifiée entre les paramètres et entre les 2 expériences

Pour l'instant: seulement avec les échantillons T2K (collaboration dont je fais partie) et méthode simplifiée

Estimation des incertitudes systématiques de détection

Markov Chain Monte Carlo

MC = « données de simulation » atmosphériques avec les coupures de T2K (3 échantillons: 1Re, 1Rmu et 1Rede)

Décalage et déformation des distributions des variables utilisées (17) pour les coupures (facteurs multiplicatif et additif: paire $\alpha/\beta, \alpha*\text{var}+\beta$)

- Construit les histogrammes des variables de coupure nominaux et ceux modifiés (tirage dans des fonctions de propositions gaussiennes)
- Bin par bin : calcul de vraisemblance (Poisson) entre les 2
- $proba = \min(1, e^{(LL_{tot} - LL_{[j-1]})}) \rightarrow$ Metropolis-Hastings
- if (p <= proba) \rightarrow Accepté \rightarrow Random
- Adapter les fonctions de proposition pour le prochain « step » du MCMC

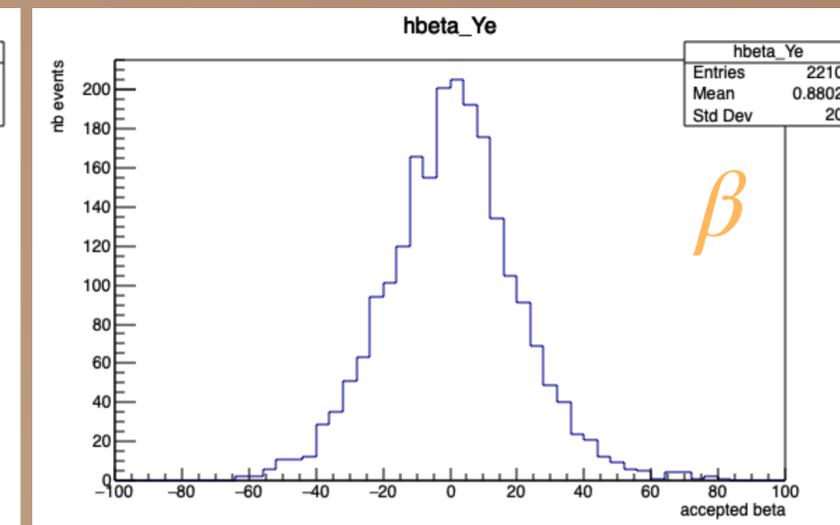
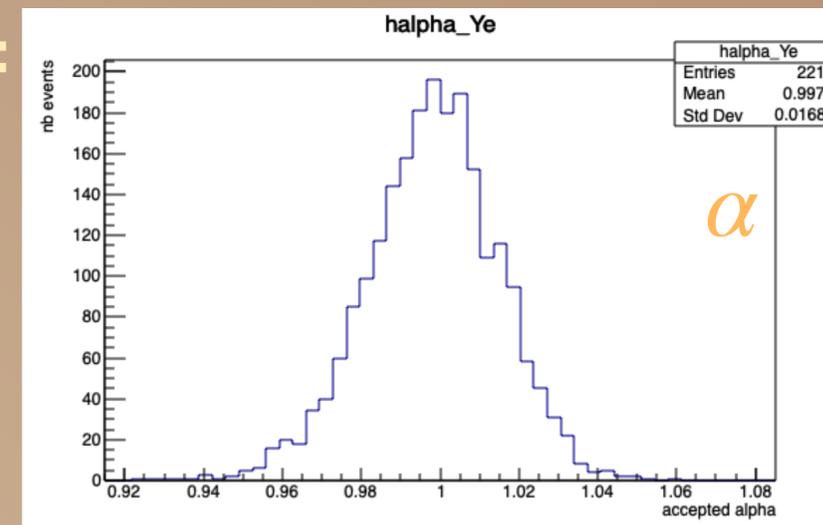
T2K (9 coupures) :

- Wall
- To wall
- Electron momentum
- Nb rings \rightarrow variable discrete
- E/mu separation
- Momentum
- Nb of decay electrons \rightarrow variable discrete
- Separation with pion
- Reconstructed energy

Variables continues (6) :

- fq1rpos *3components *2PID
- fq1rdir *2 angles *2PID
- fq1rmom *2PID
- fq1rnll *3PID
- fqpi0nll
- fqpi0mass

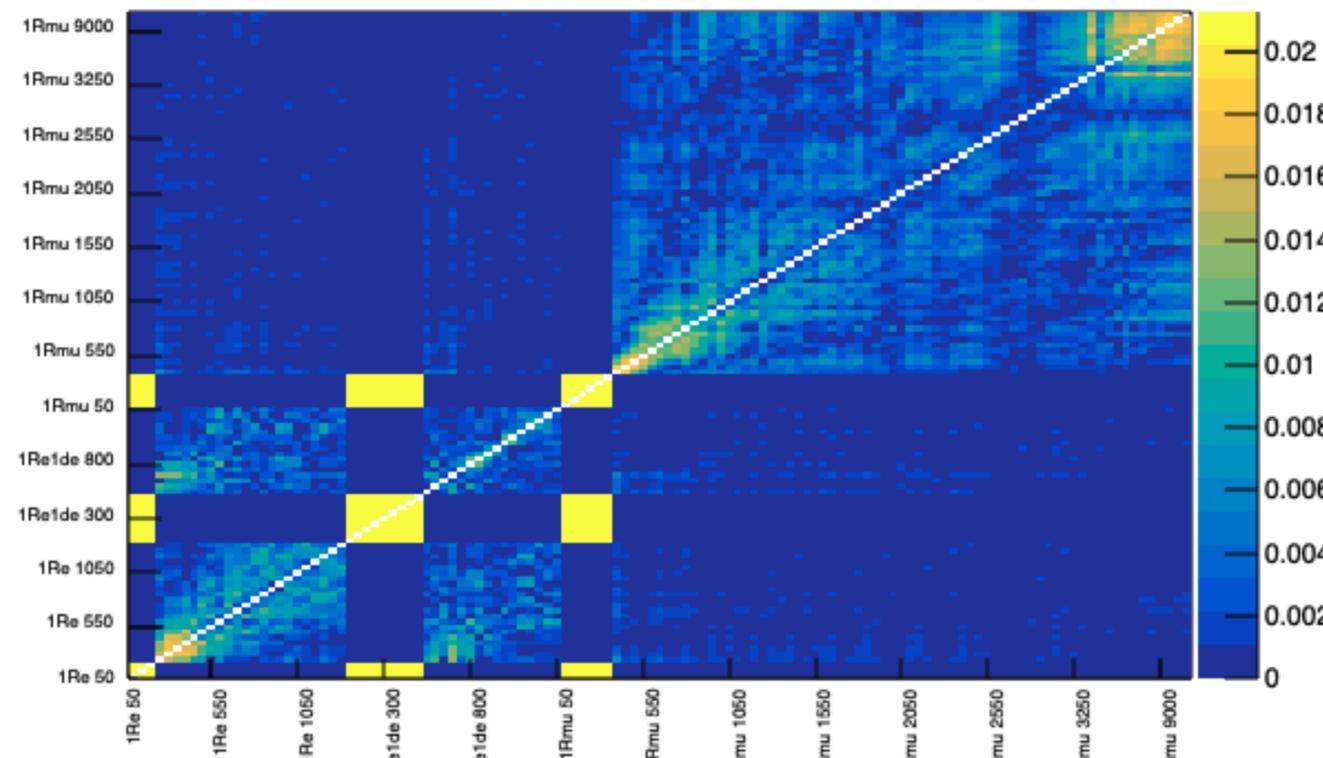
\rightarrow 17 variables



Estimation des incertitudes systématiques de détection

Distributions des valeurs de α/β \rightarrow impact sur le nb d'évènements et études associées

Correlation in nb of events



Ecriture , compréhension et optimisation

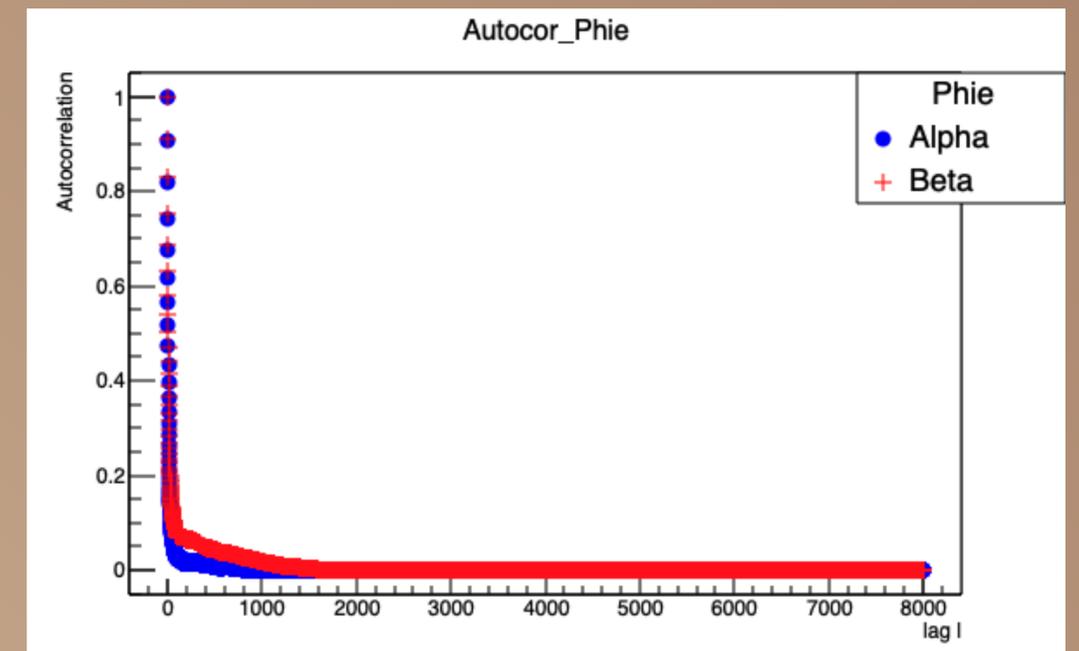
23mn pour 10000 steps

Acceptance faible (nb paramètres corrélation) : 0.035%

Autocorrélation

Sans diagonale pour des questions d'échelle de couleur

\rightarrow corrélations attendues entre bins proches du même échantillon et entre le même bin de deux échantillons



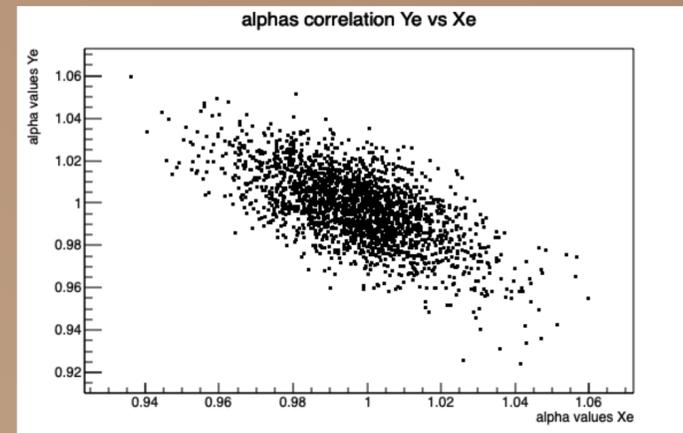
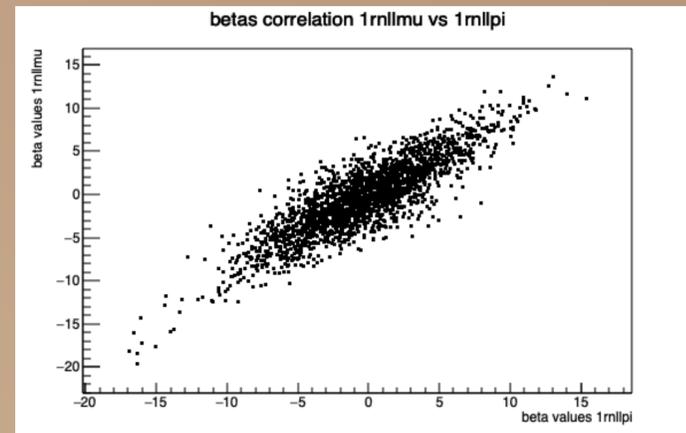
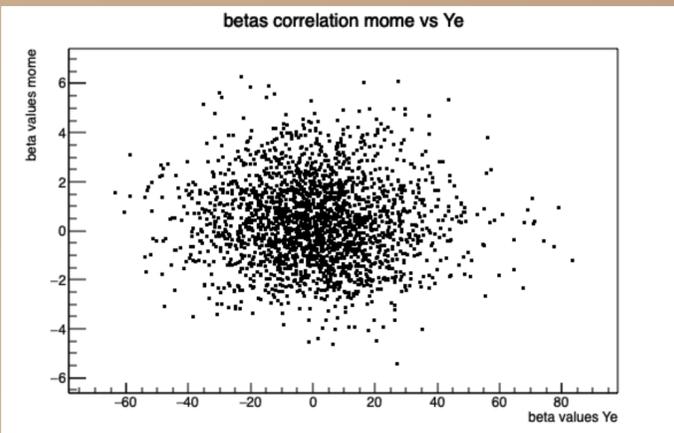
Estimation des incertitudes systématiques de détection

Améliorer performances en affinant les fonctions de proposition avec les corrélations a priori venant d'un ajustement

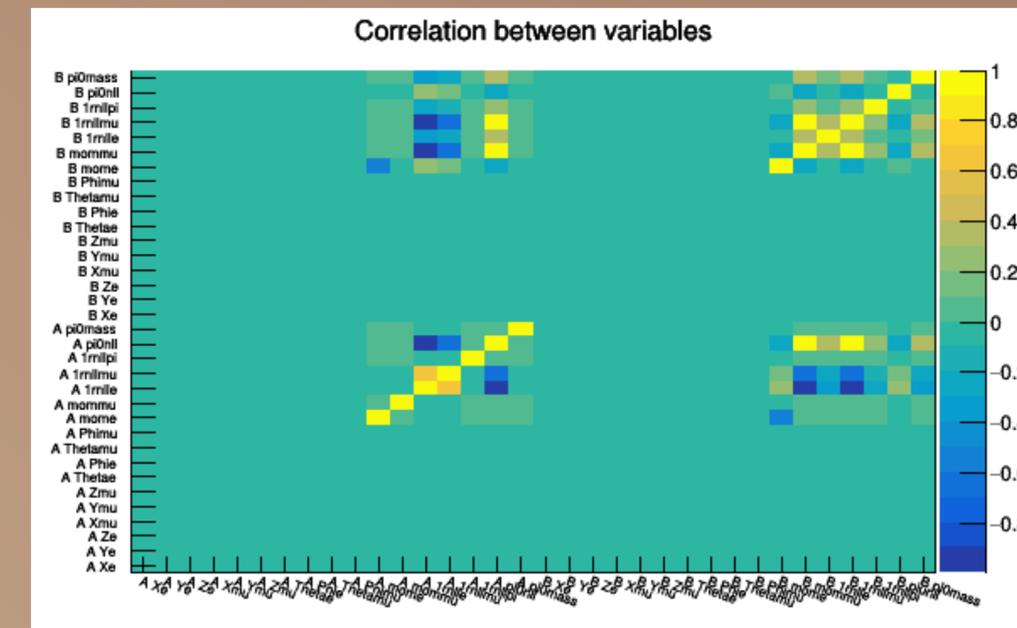
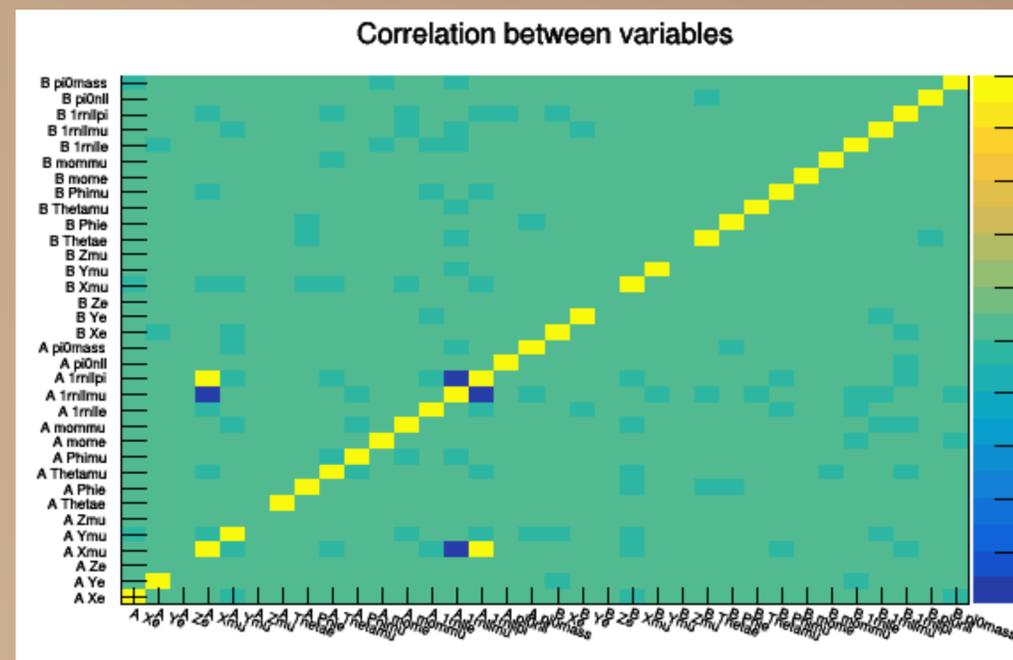
—> lancer des « jobs » au CC in2p3 pour avoir suffisamment de statistique

La suite :

- ▶ Prendre des α/β différents par « topologies vraies » (simulation) et par bin en énergie
- ▶ Comparaison avec les matrices d'erreurs existantes
- ▶ Analyse de l'impact des différents paramètres



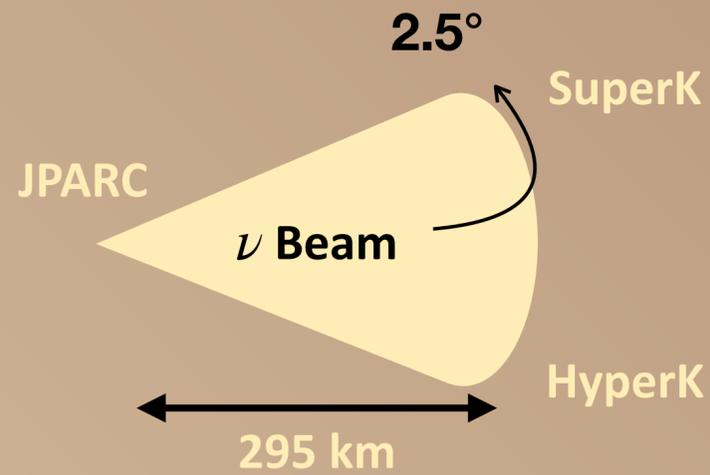
Toutes sauf Z : certaines corrélations trouvées



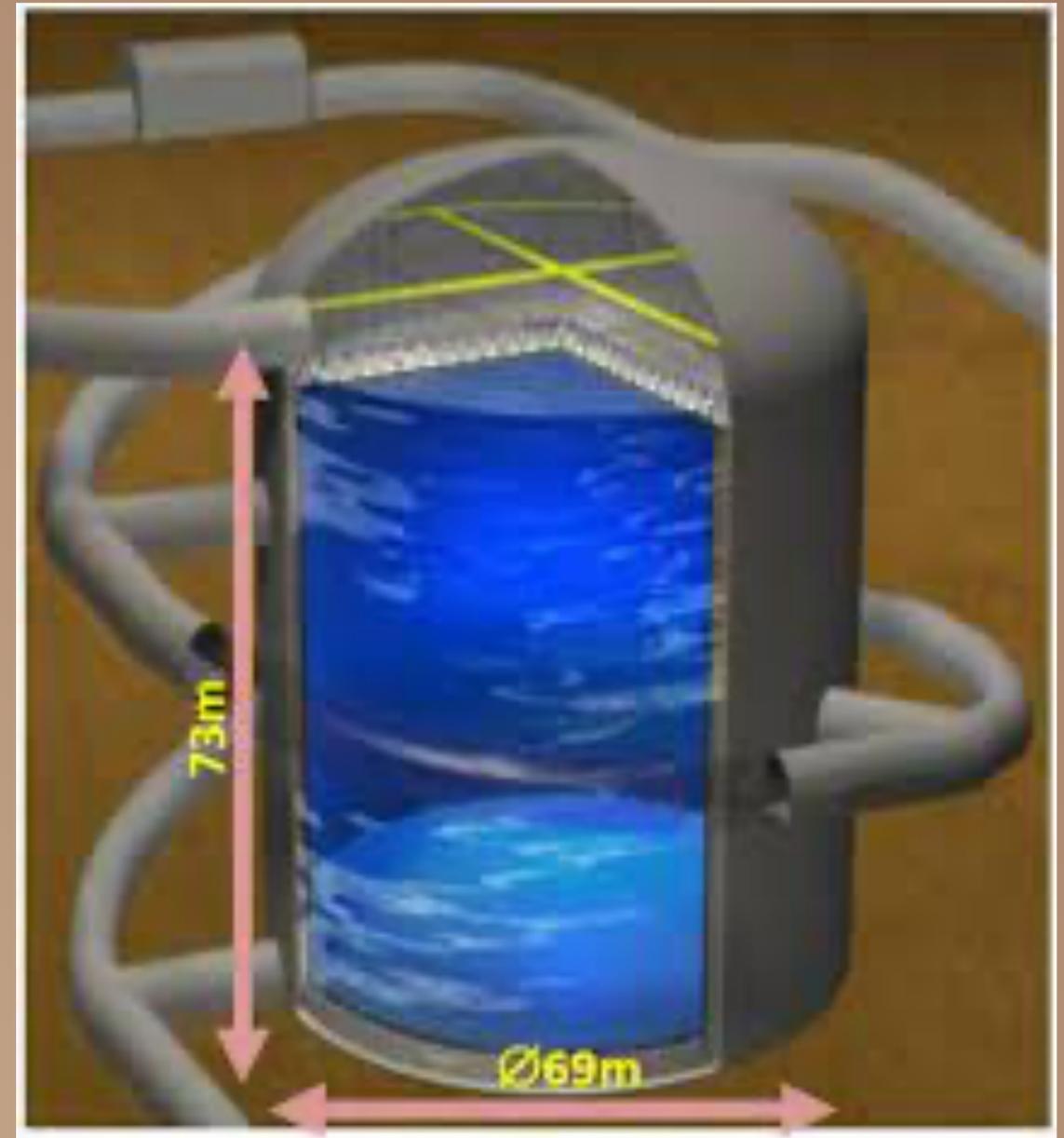
Toutes sauf dir et pos : plus de corr trouvées

—>Hyper-Kamiokande

Date prévisionnelle de prise de données: 2027

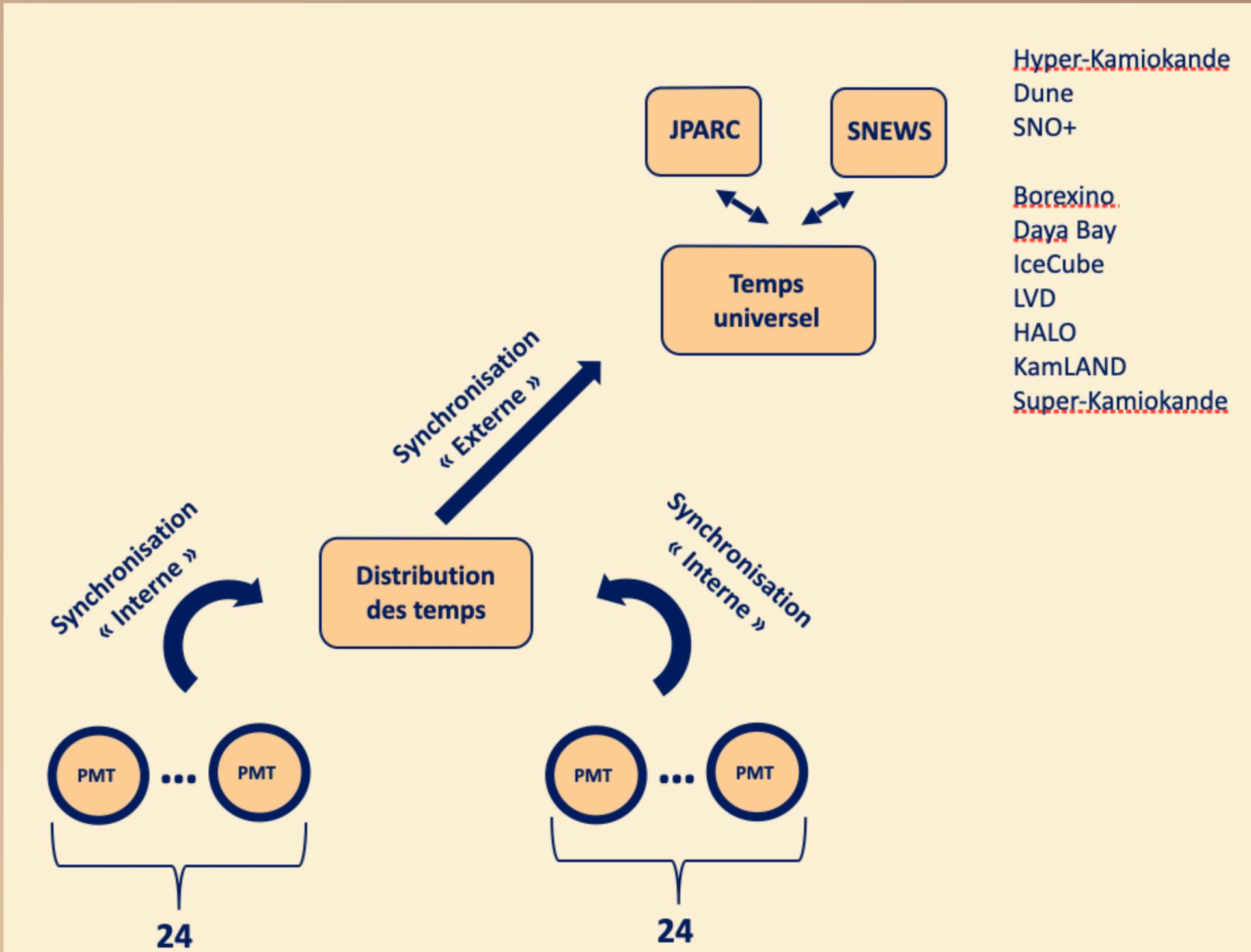


- ▶ Une seule collaboration internationale
- ➔ Large programme de Physique (delta CP, supernovae, ...)
- ▶ Cuve 5 fois plus grande
- ▶ Synchronisation d'horloges et PMT plus performants
- ➔ Statistiques beaucoup plus importantes



—>Hyper-Kamiokande

Date prévisionnelle de prise de données: 2027



Systeme de distribution et de synchronisation d'horloges

Hyper-Kamiokande

Date prévisionnelle de prise de données: 2027

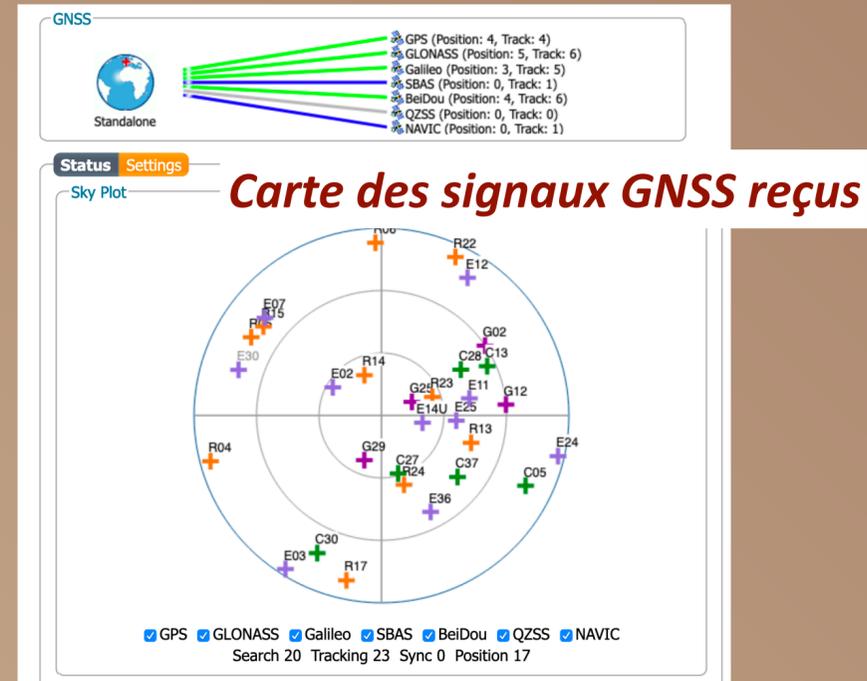
► Distribution d'horloges

► R&D : caractérisation de délais et de dérives avec antenne GNSS et horloge atomique, (installation et tests au Japon)

► 1ère acquisition GNSS au labo

► Études de sensibilité / simulation (impact sur la reconstruction des évènements et la Physique)

► Analyse combinée



Intégration de mon travail dans le groupe et dans les collaborations

Réunions

- 1 réunion du groupe LPNHE par semaine
 - 1 réunion analyse combinée 2x par mois
 - 1 réunion estimation des effets systématiques de détection 2x par mois
 - 1 réunion analyse d'oscillation 2x par mois
 - 1 réunion du groupe d'analyse P-theta 2x par mois
 - Discussions informelles
- Quota de shifts à distance pour devenir co-auteur de T2K
 - Co-auteur de HK automatiquement
 - Travail pour l'analyse d'oscillation 2021: collaboration et comparaison de résultats avec les autres analystes
 - Test Beam à DESY fin Juin si possible (détecteur proche mais activité principale du groupe neutrino au LPNHE)

—> présentations aux réunions selon l'avancement des résultats/études

Formations et écoles

Formations:

- ▶ Journée de sensibilisation à la pédagogie —> 1 point
- ▶ Cours de statistiques de l'ED —> 4 points
- ▶ (Table ronde « Job day » de l'ED) —> 1 point
- ▶ Formation à l'éthique de l'ED —> 1 point

- ▶ Enseignement (sur deux ans) —> 2 points
- ▶ Astrophysique des hautes énergies —> 2 points
- ▶ Formation de l'UFR pour l'enseignement —> 2 points

À compléter 13/15

Ecoles :

- ▶ School of statistics (IN2P3), janv.2021

- ▶ International PhD Summer school on Neutrinos, Niels Bohr Institute, Copenhagen (100% en distanciel) Juillet 2021

Conclusion

En cours :

MCMC : Amélioration des performances et premiers résultats avec suffisamment de statistique

OA 2021: Contribution à l'implémentation et la validation de nouveaux paramètres systématiques

HK : Littérature, planification des mesures/ études à faire, première prise en main des signaux GPS

Futur :

MCMC : Continuité (ajout des coupures SK puis études HK)

HK: Caractérisation du système de synchronisation d'horloges envisagé au laboratoire , installation/tests au Japon (?)

HK : Études de sensibilité (simulation)

Participation au **test beam** à DESY si possible

Enseignement: Septembre