

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

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

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}

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

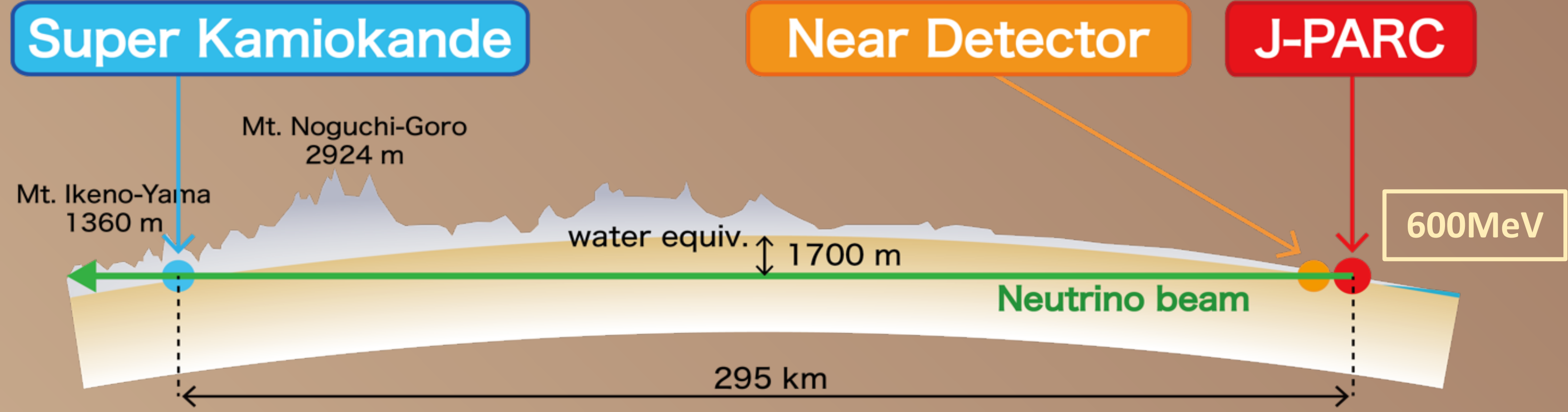
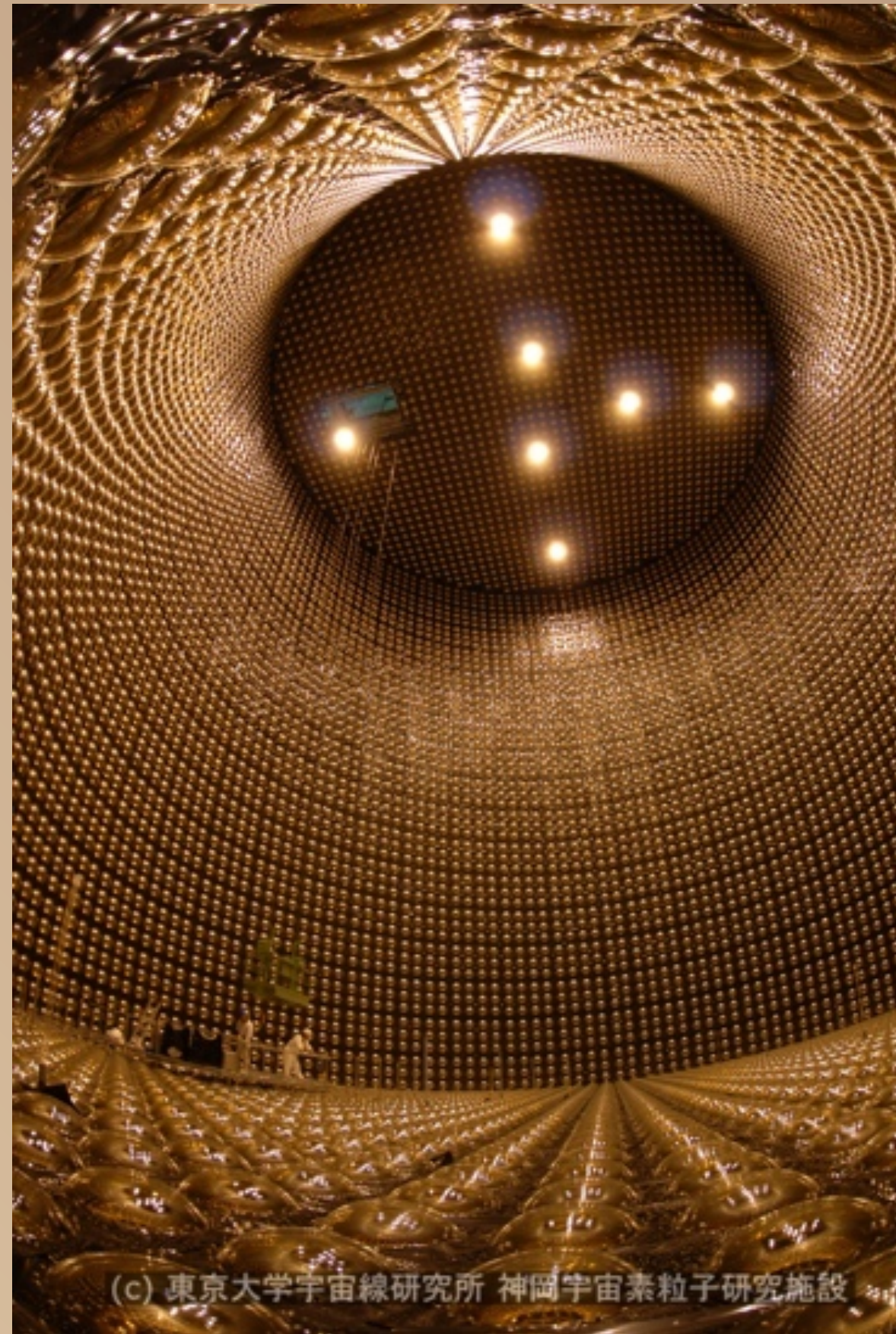
(pour $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{31}^2 \approx \Delta m_{32}^2$ et $\frac{\Delta m_{12}^2 L}{E} \ll 1$)

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

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

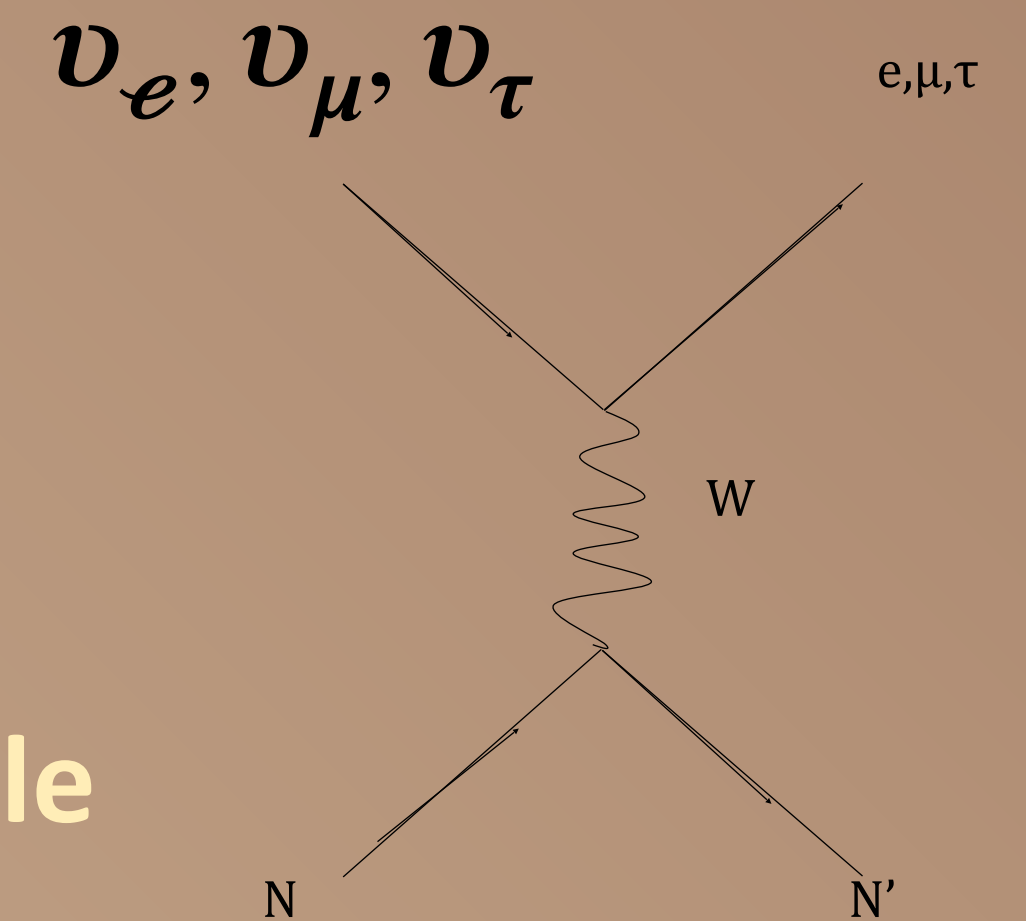
Tokai to Kamioka (T2K)

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)

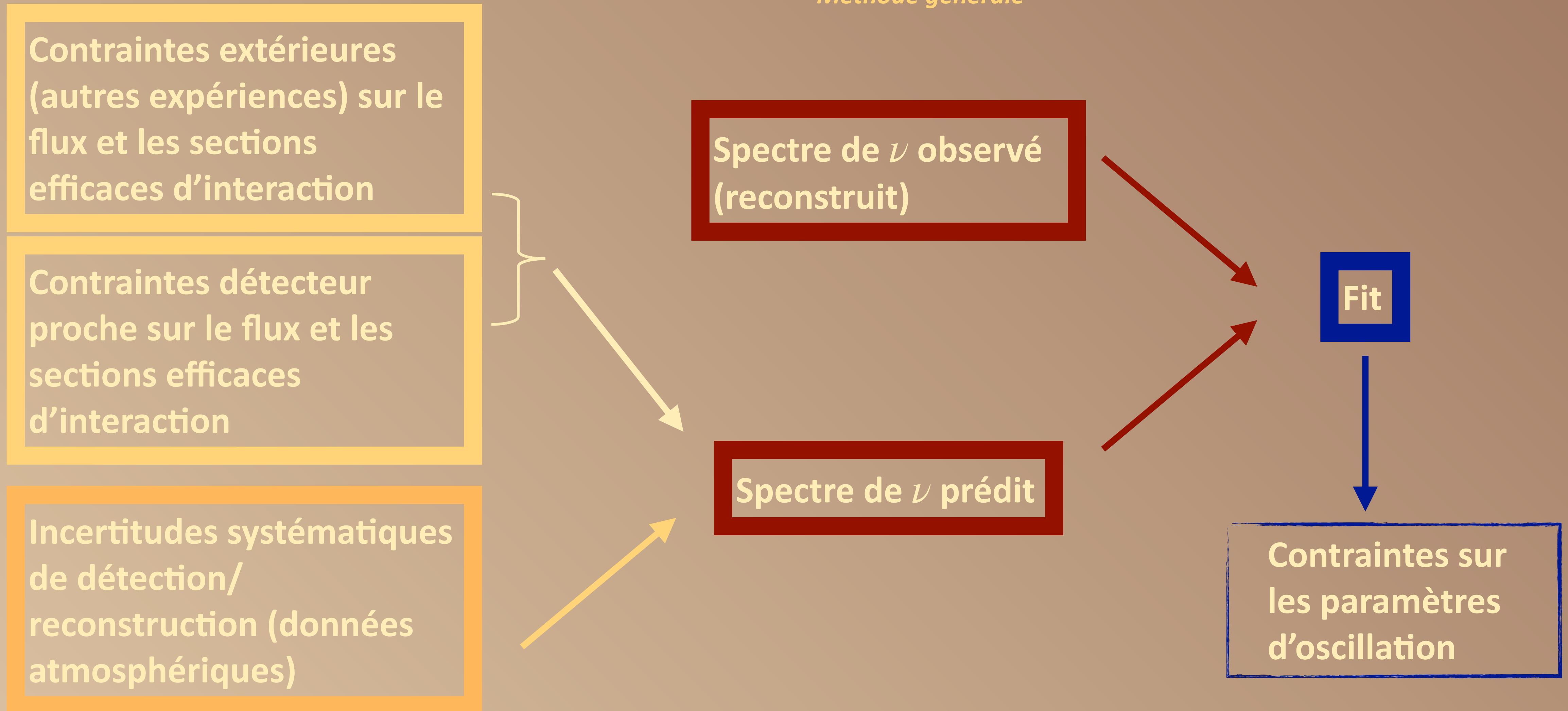
- Mesurables: saveur, énergie du lepton, angle lepton/ ν



t2k-experiment.org
39 m

Méthode d'analyse dans le groupe P-theta

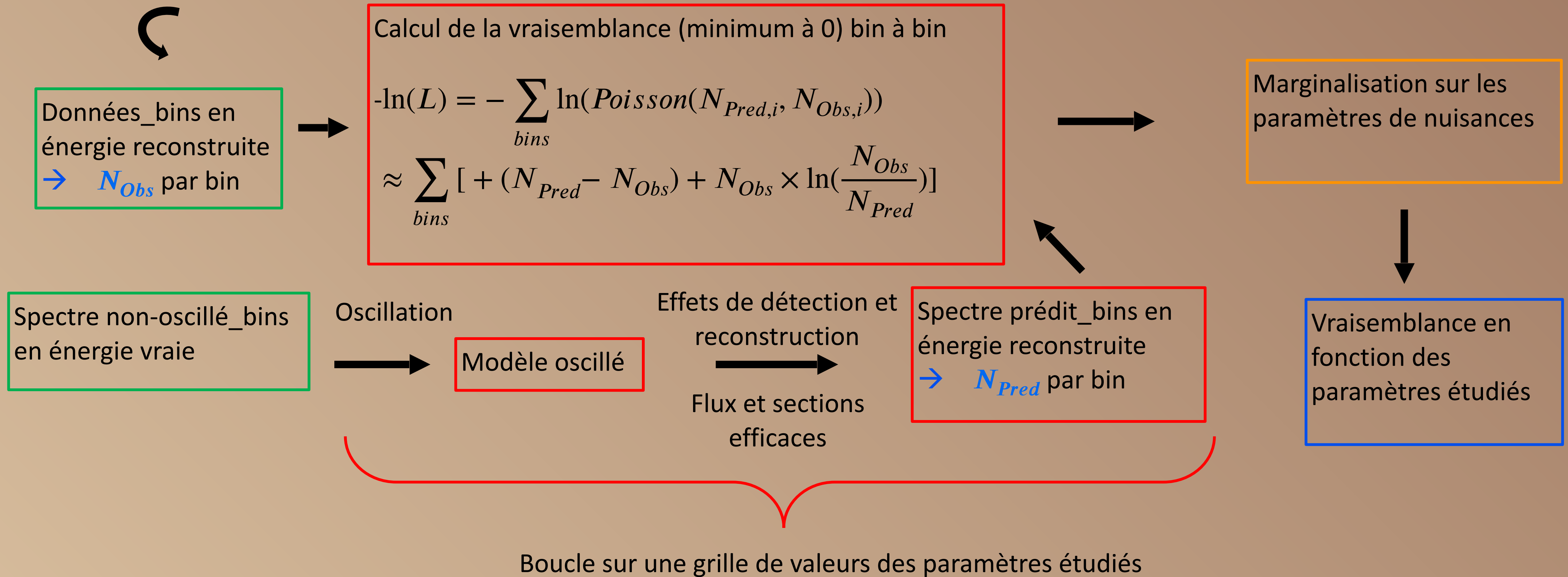
Méthode générale



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

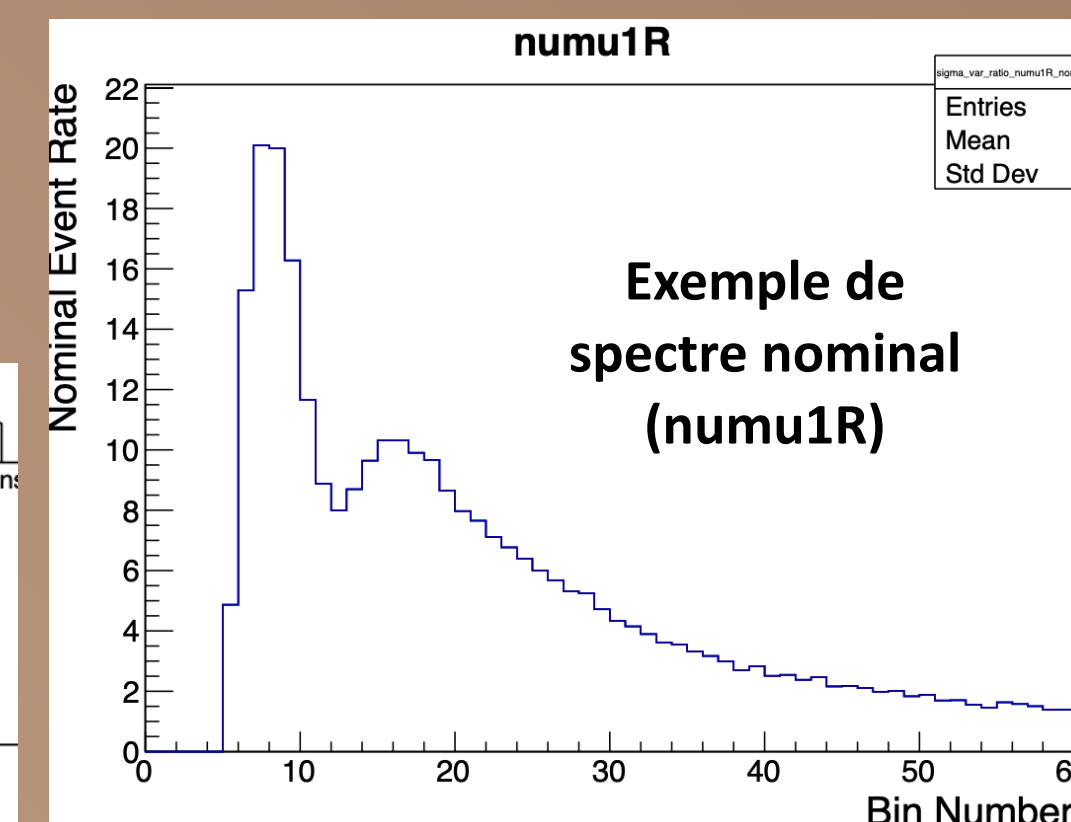
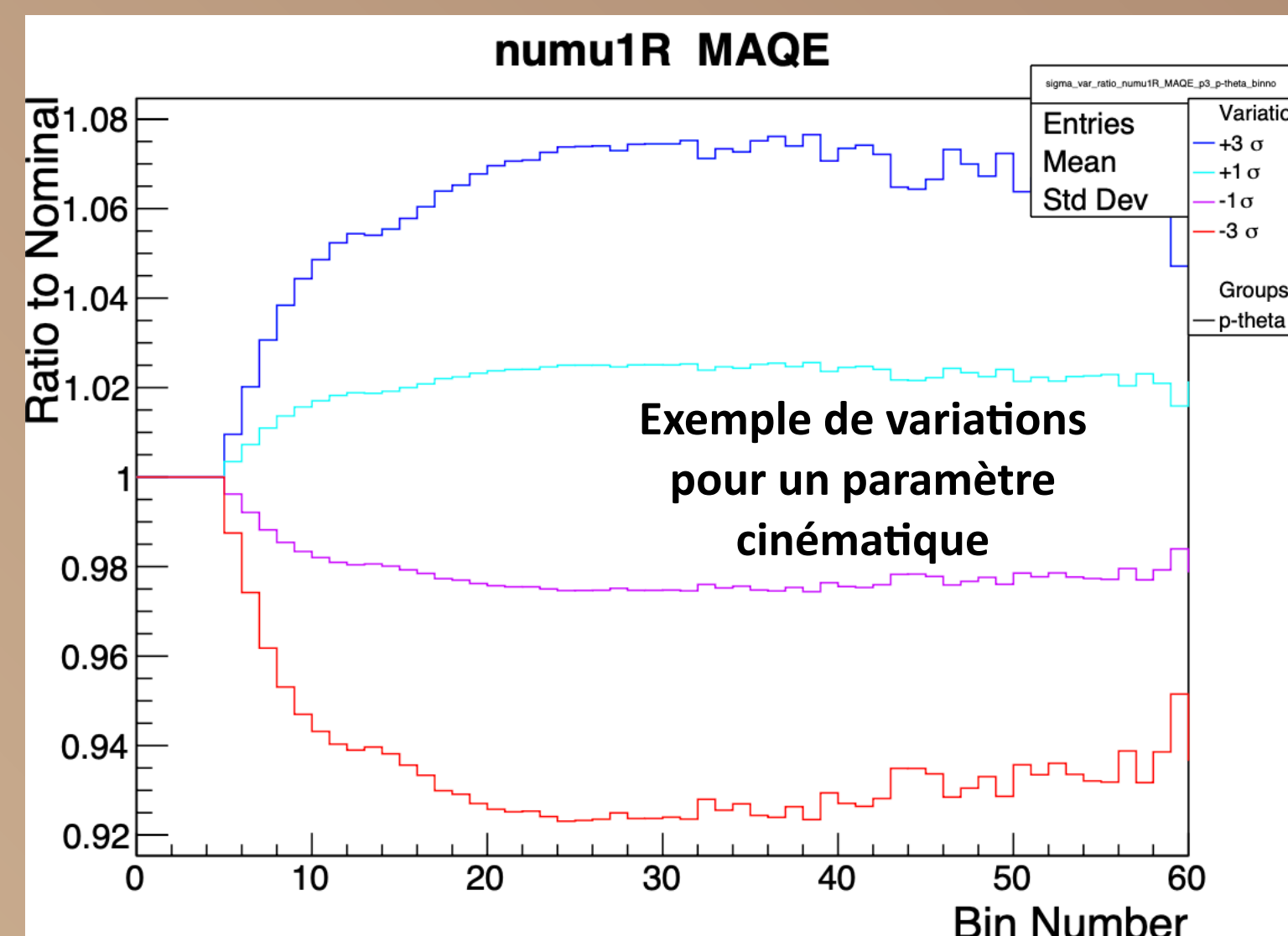
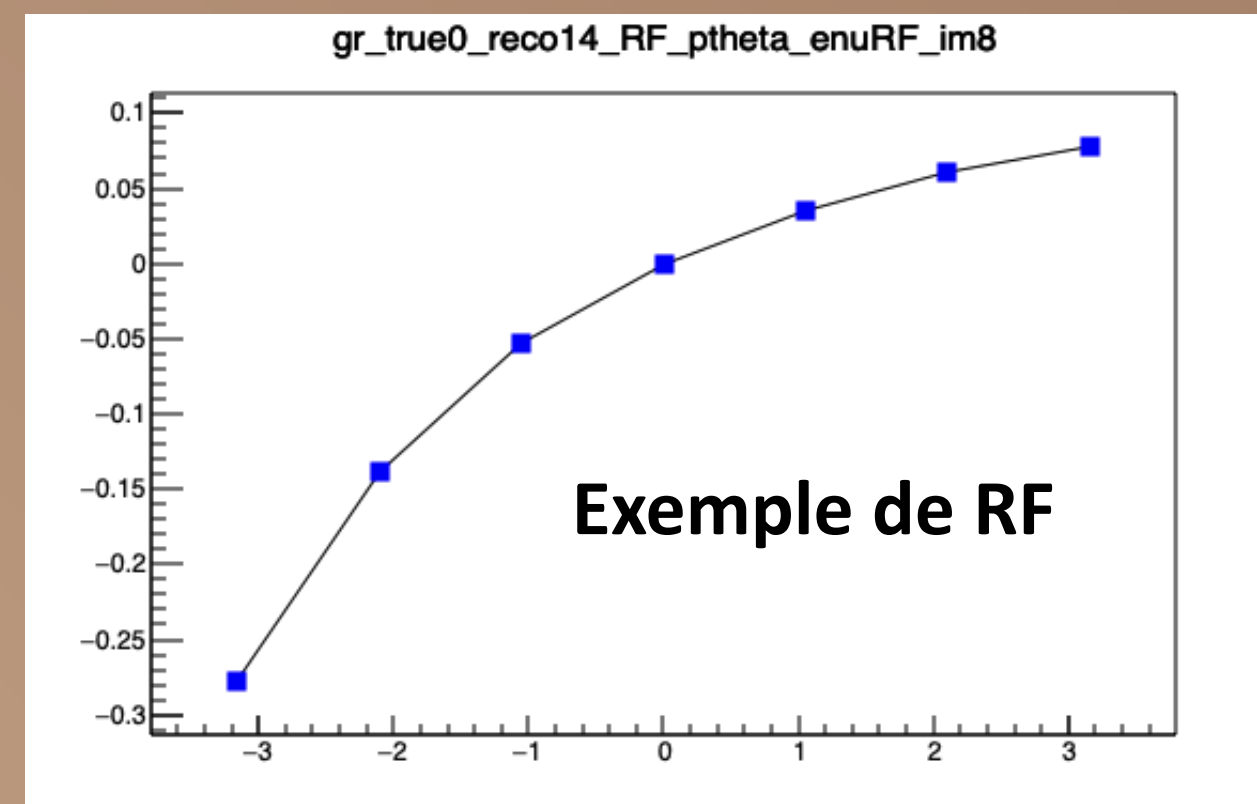
Nouveaux paramètres systématiques d'interaction (sections efficaces et énergie de liaison) venant de nouveaux modèles/nouvelles études à implémenter dans le logiciel P-theta → sur lesquels on marginalisera la vraisemblance

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)

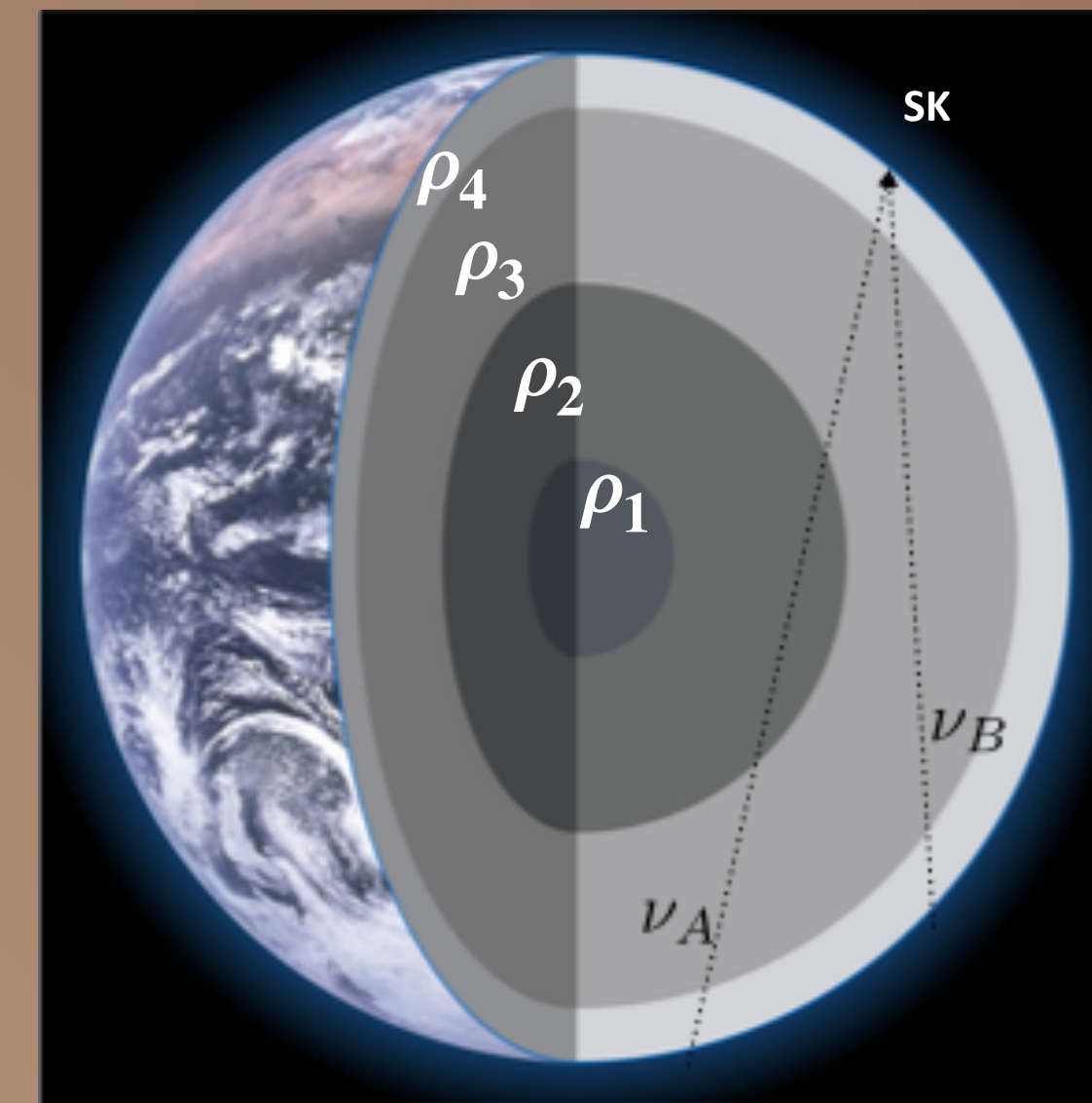


Une analyse combinée

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

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

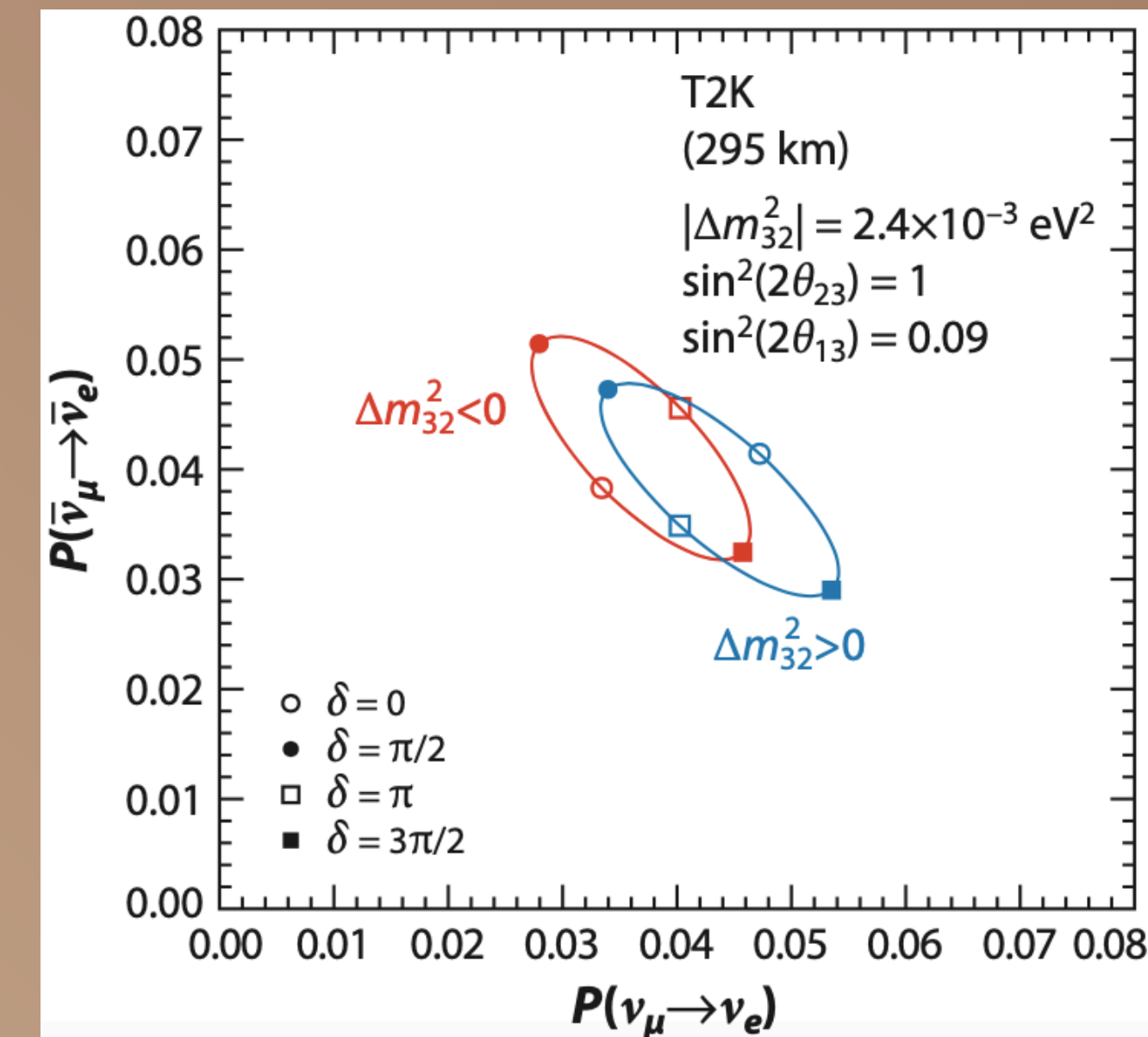
Perspective : Hyper-Kamiokande



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

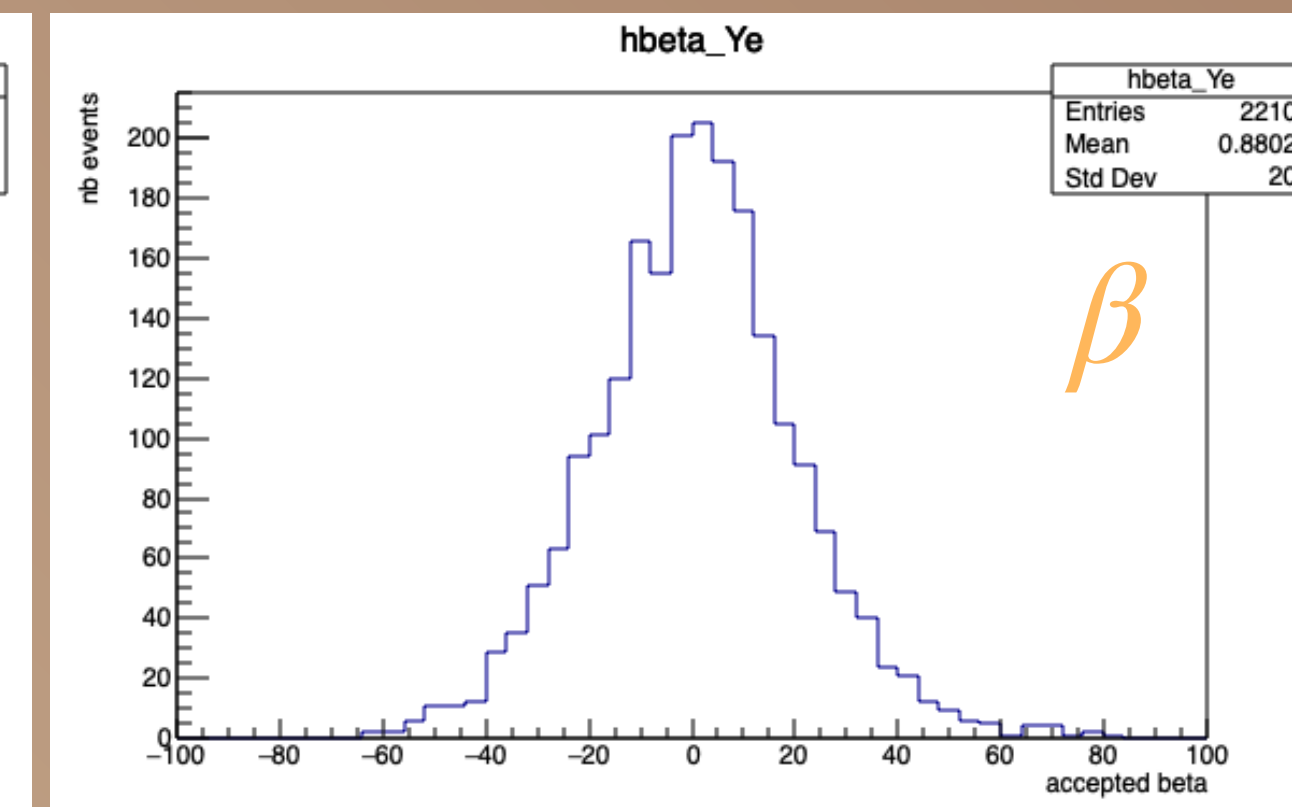
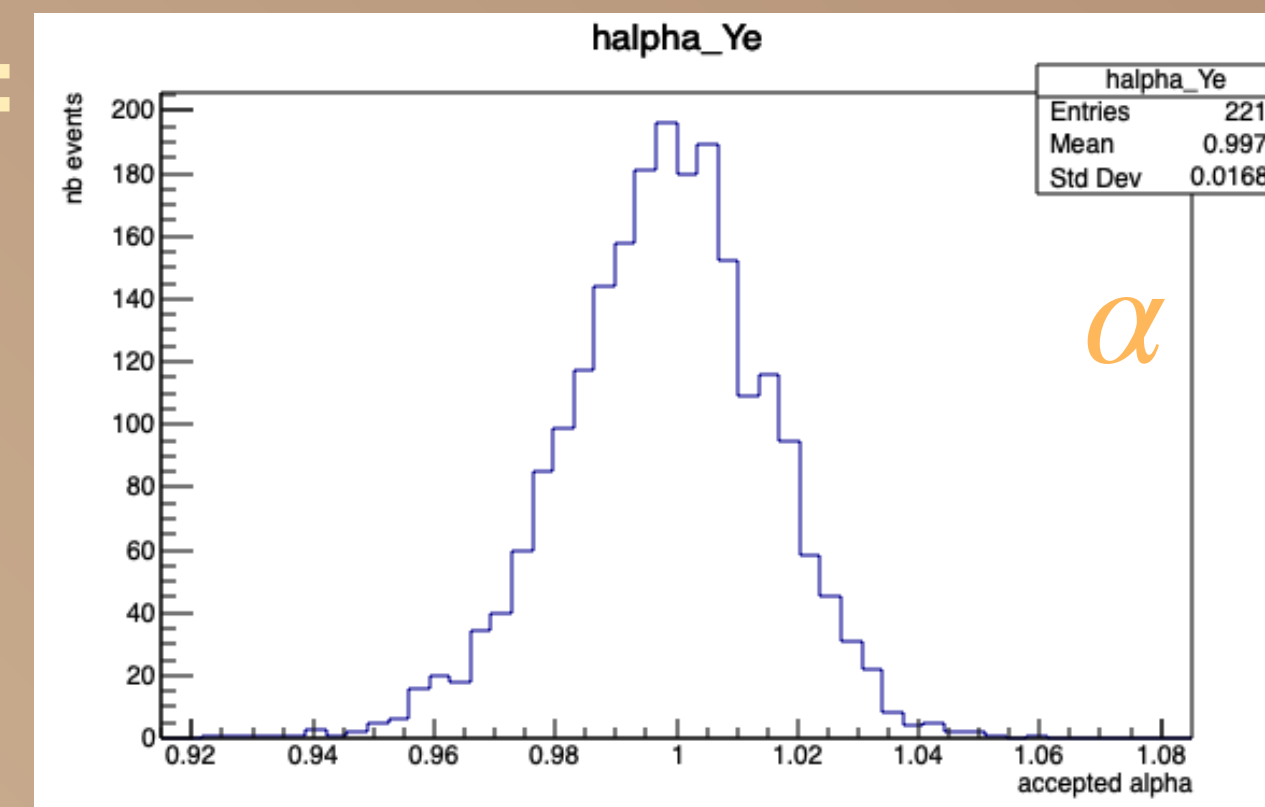
T2K (9 coupures) :

- 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

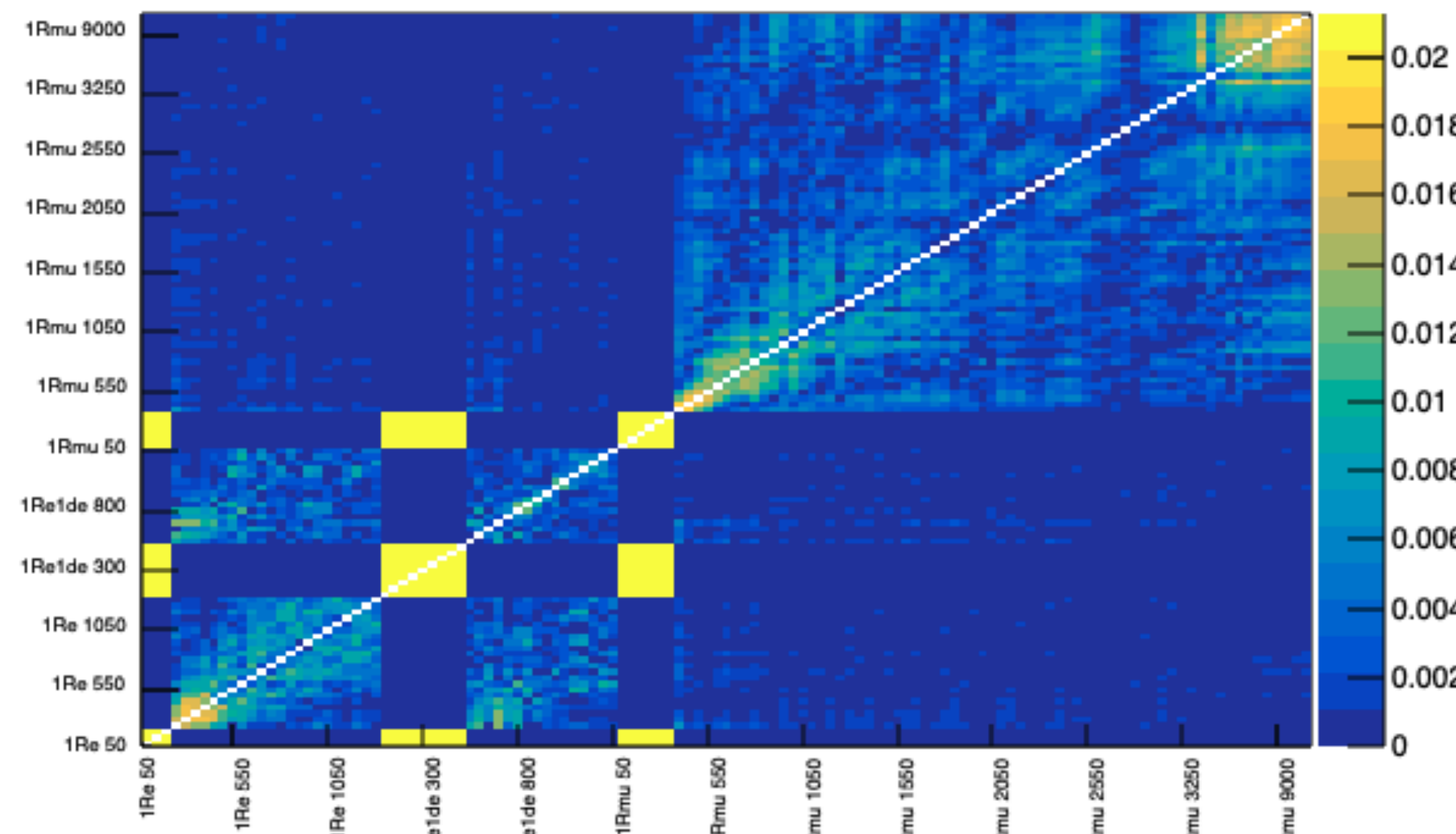
\rightarrow 17 variables



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

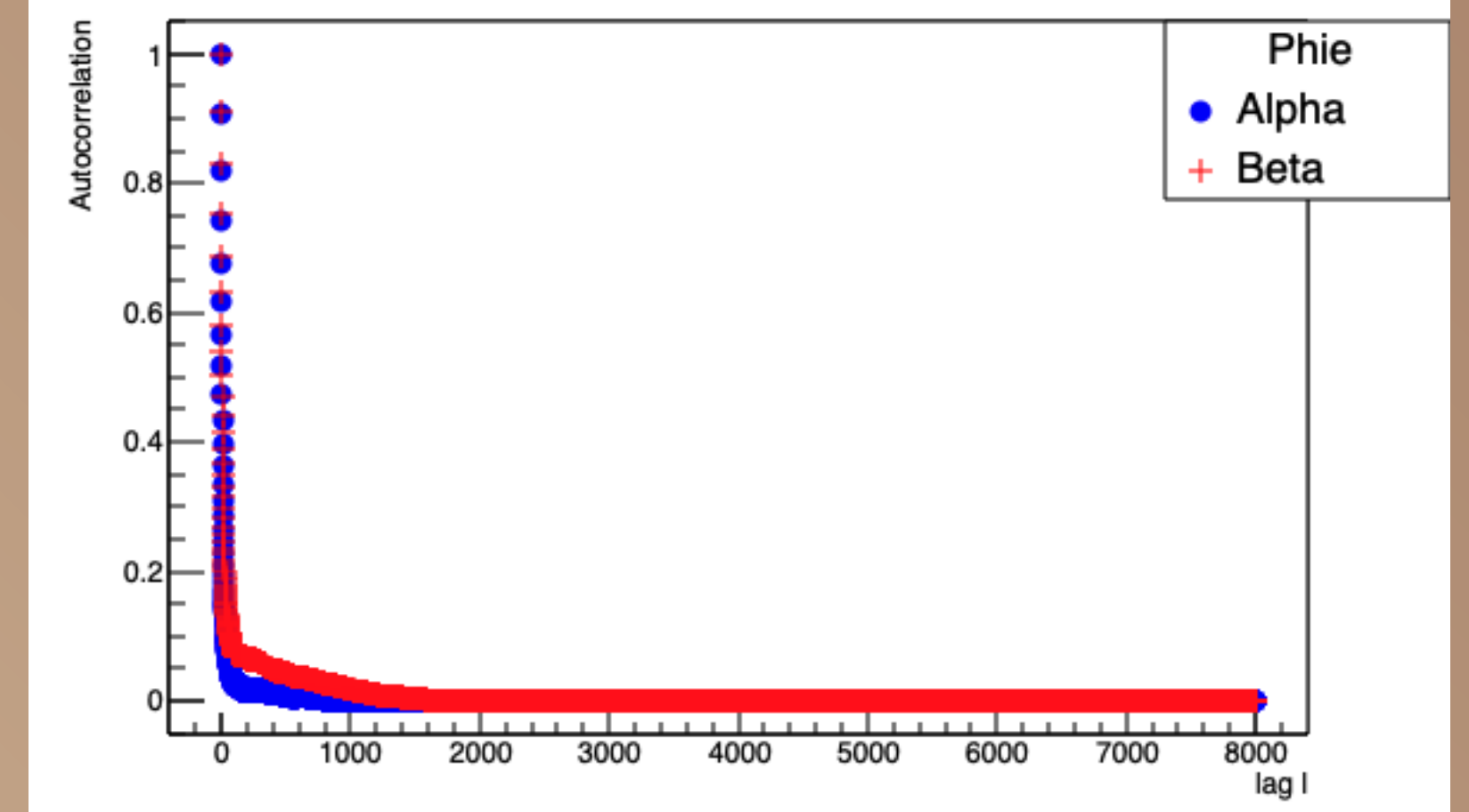
Acceptance faible (nb paramètres corrélation) : 0.035%

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

Autocor_Phie



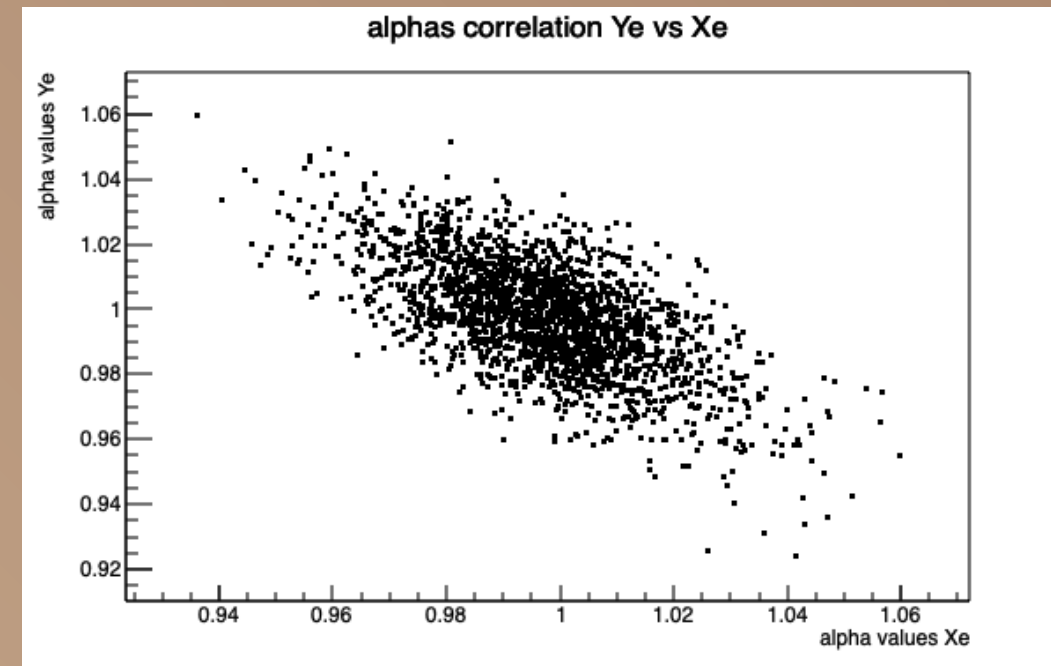
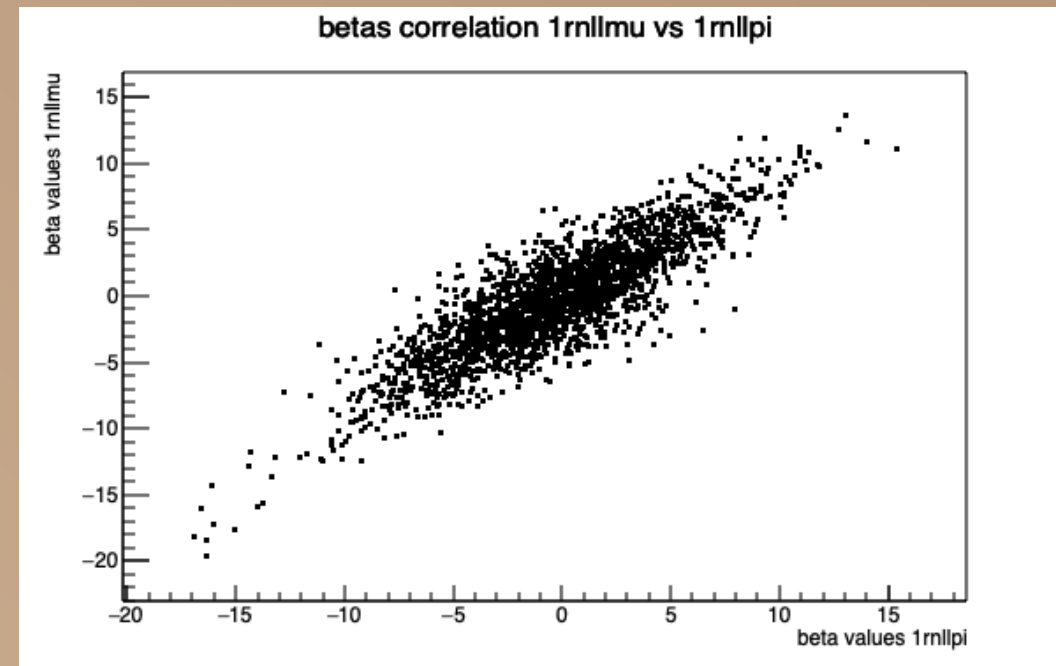
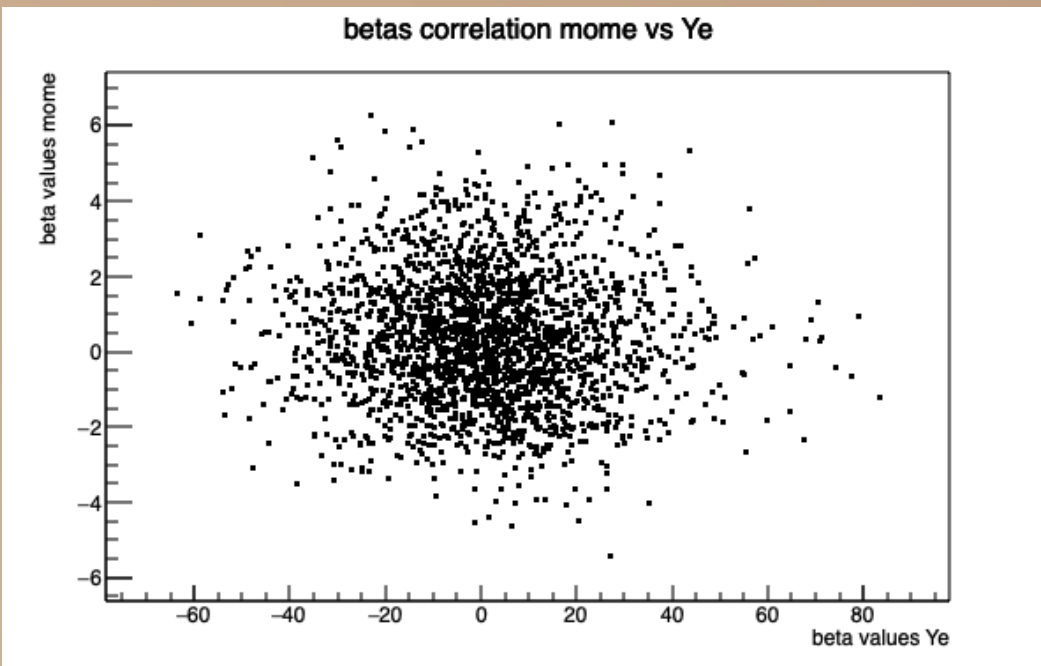
Estimation des incertitudes systématiques de détection

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

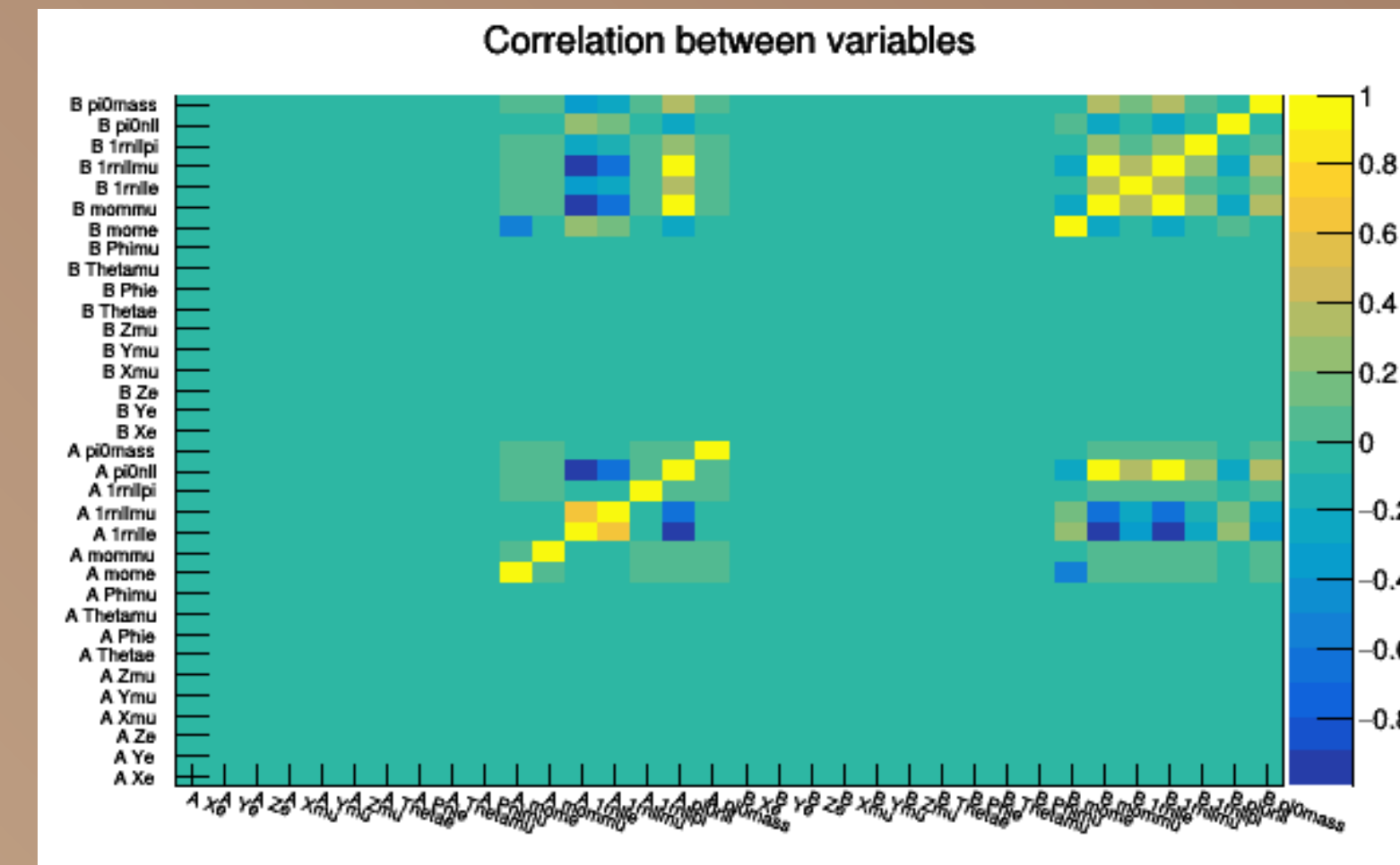
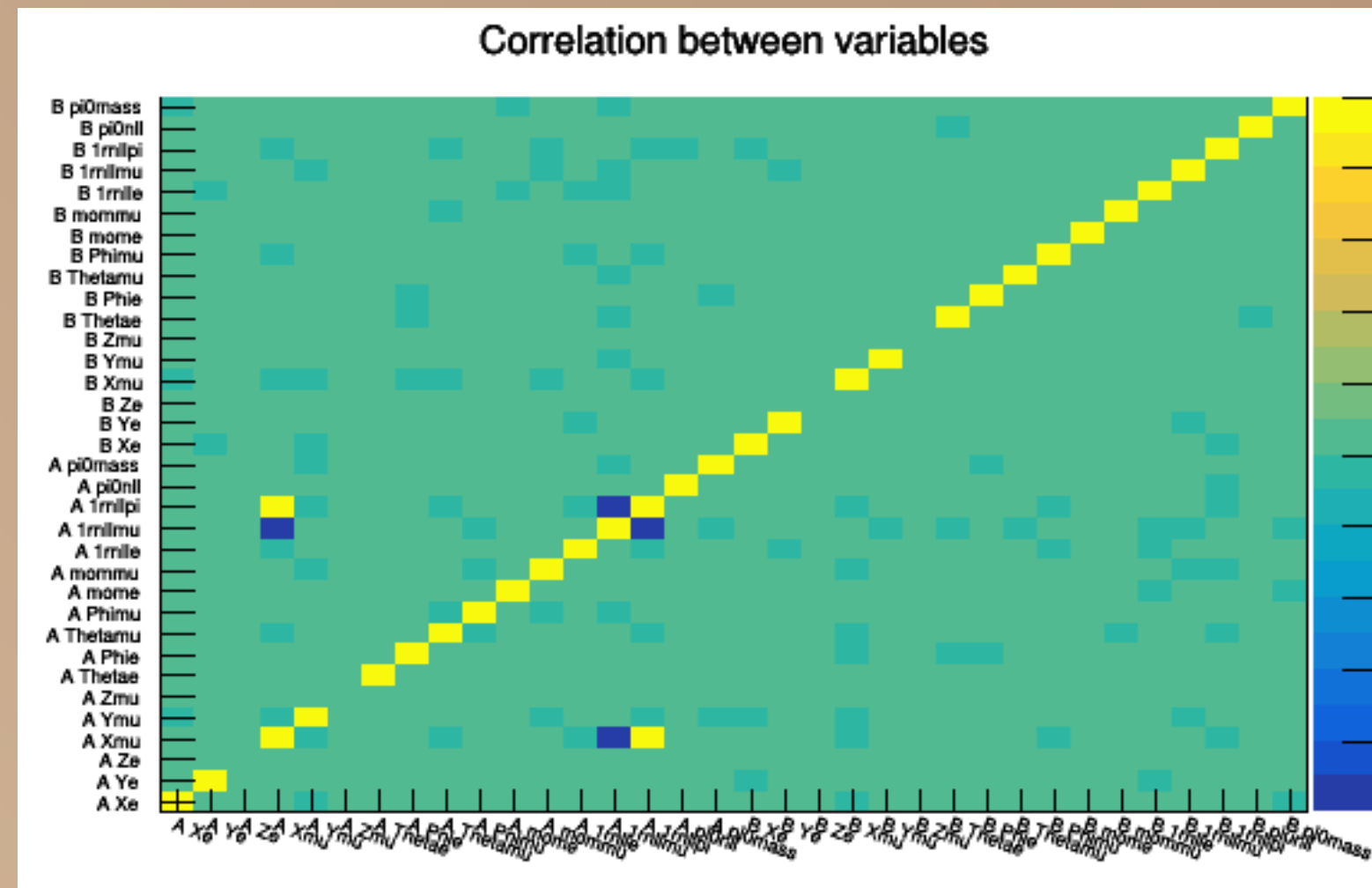
—> lancer des « jobs » au CC in2p3 pour avoir suffisamment de statistique

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



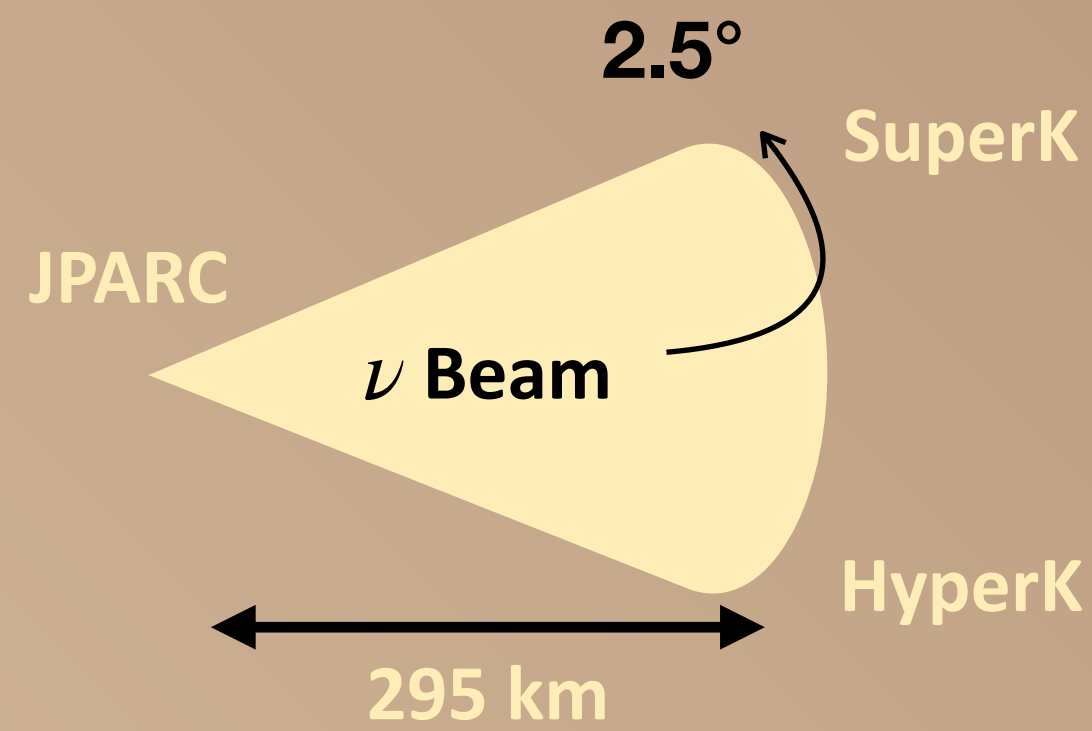
Toutes sauf Z : certaines corrélations trouvées



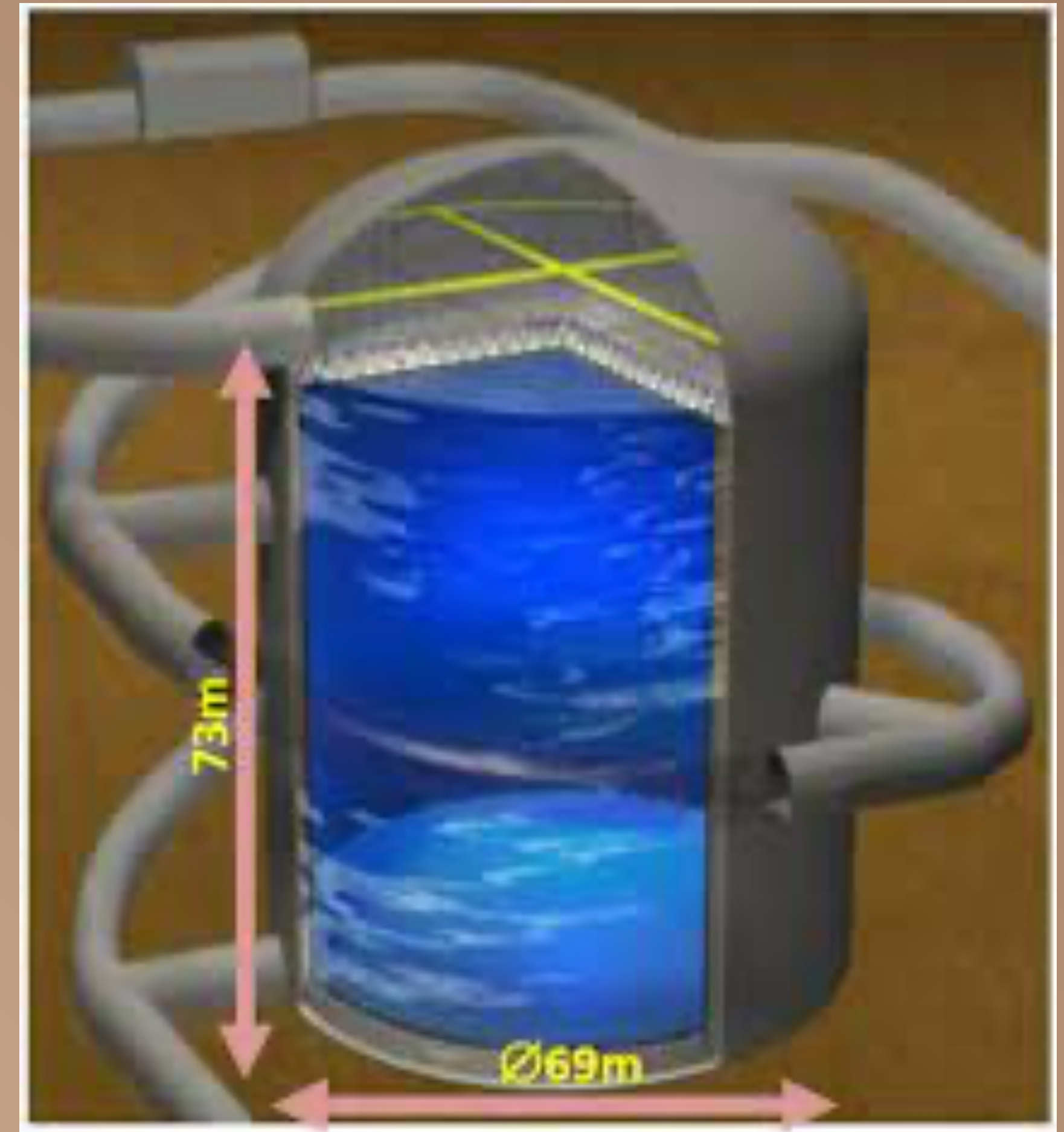
Toutes sauf dir et pos : plus de corr trouvées

—>Hyper-Kamiokande

Date prévisionnelle de prise de données: 2027

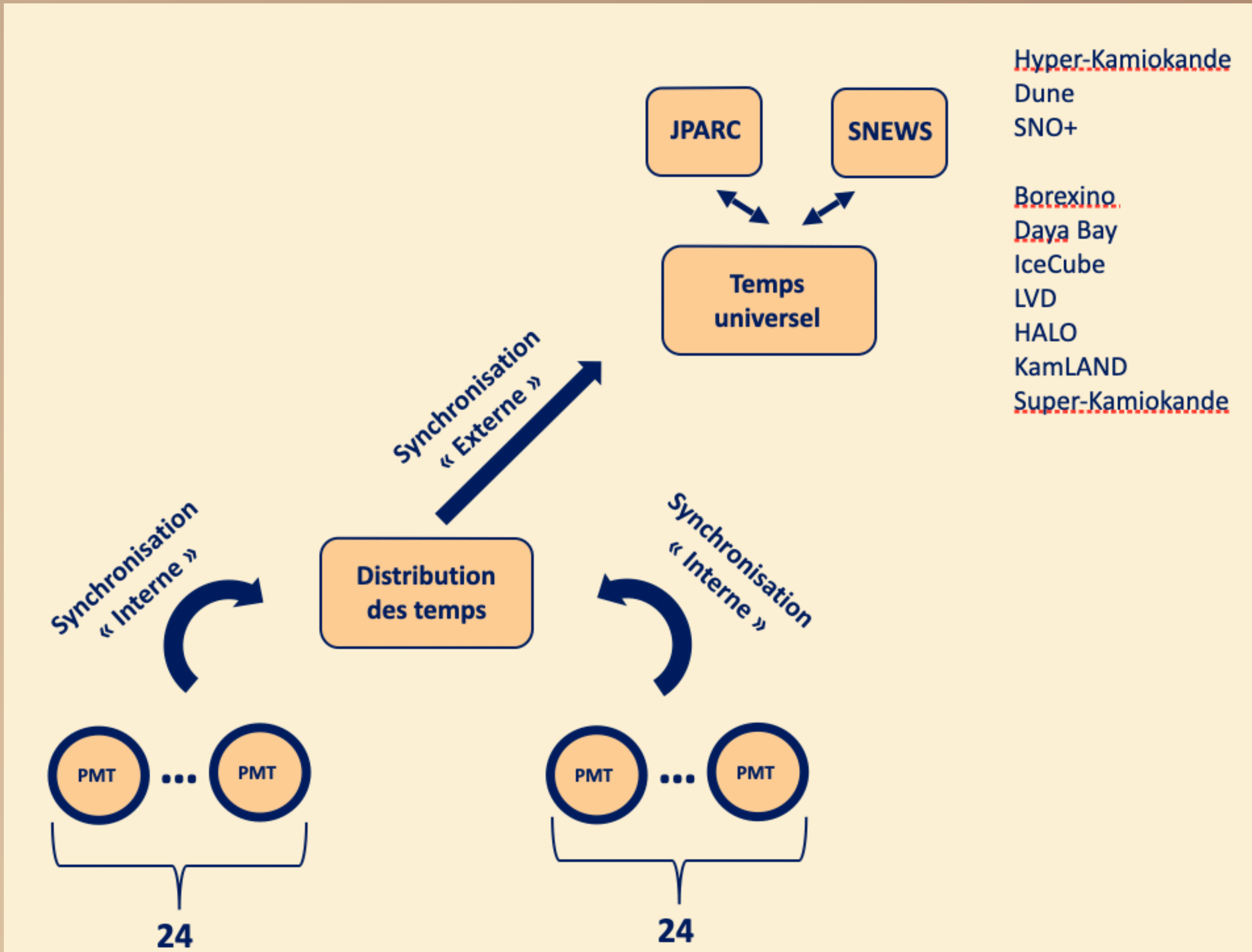


- ▶ Une seule collaboration internationale
- ➔ Large programme de Physique (delta CP, supernovae, ...)
- ▶ Cuve 5 fois plus grande
- ▶ Synchronisation d'horloges et PMT plus performants
- ➔ Statistiques beaucoup plus importantes



—>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

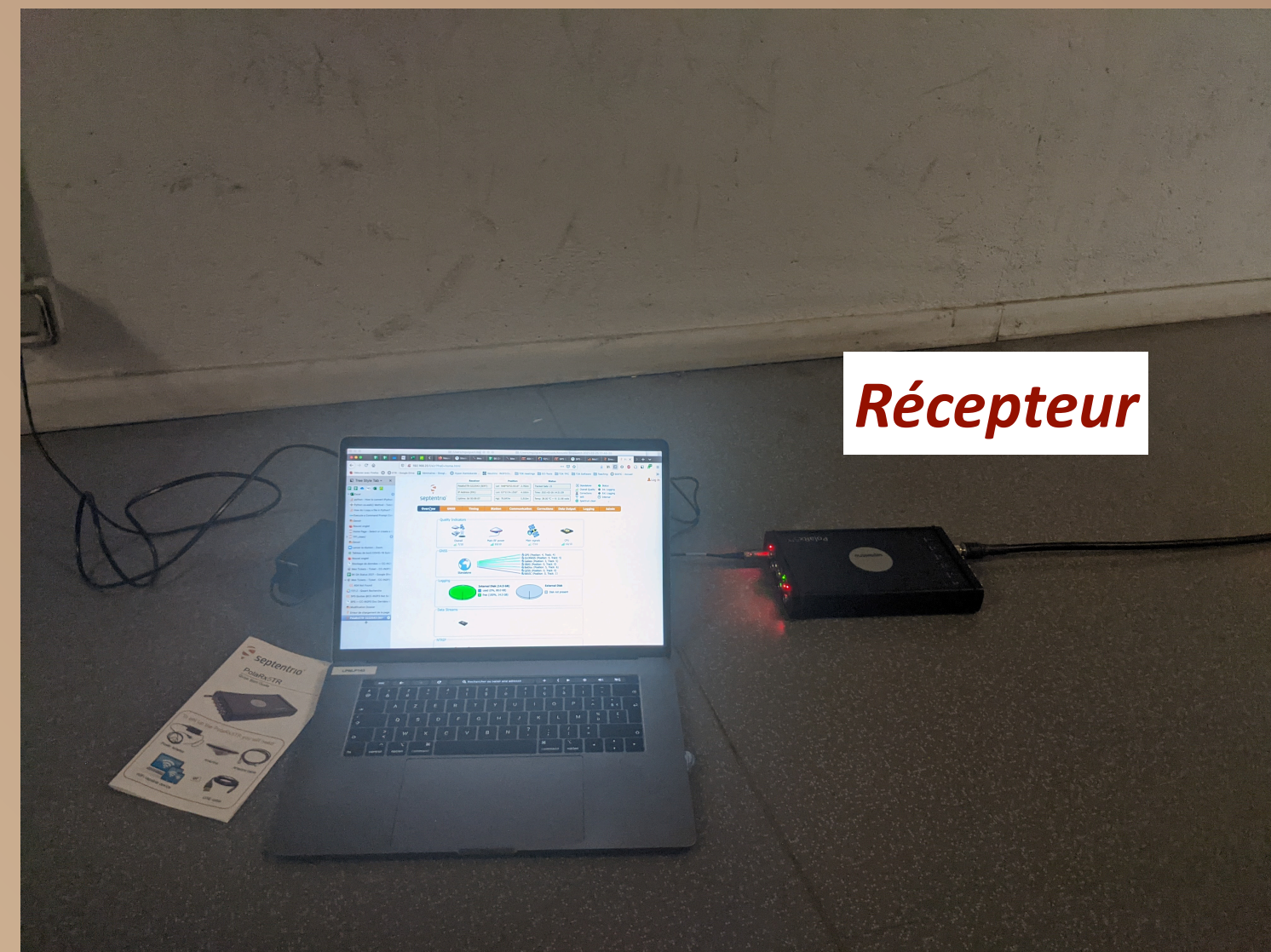
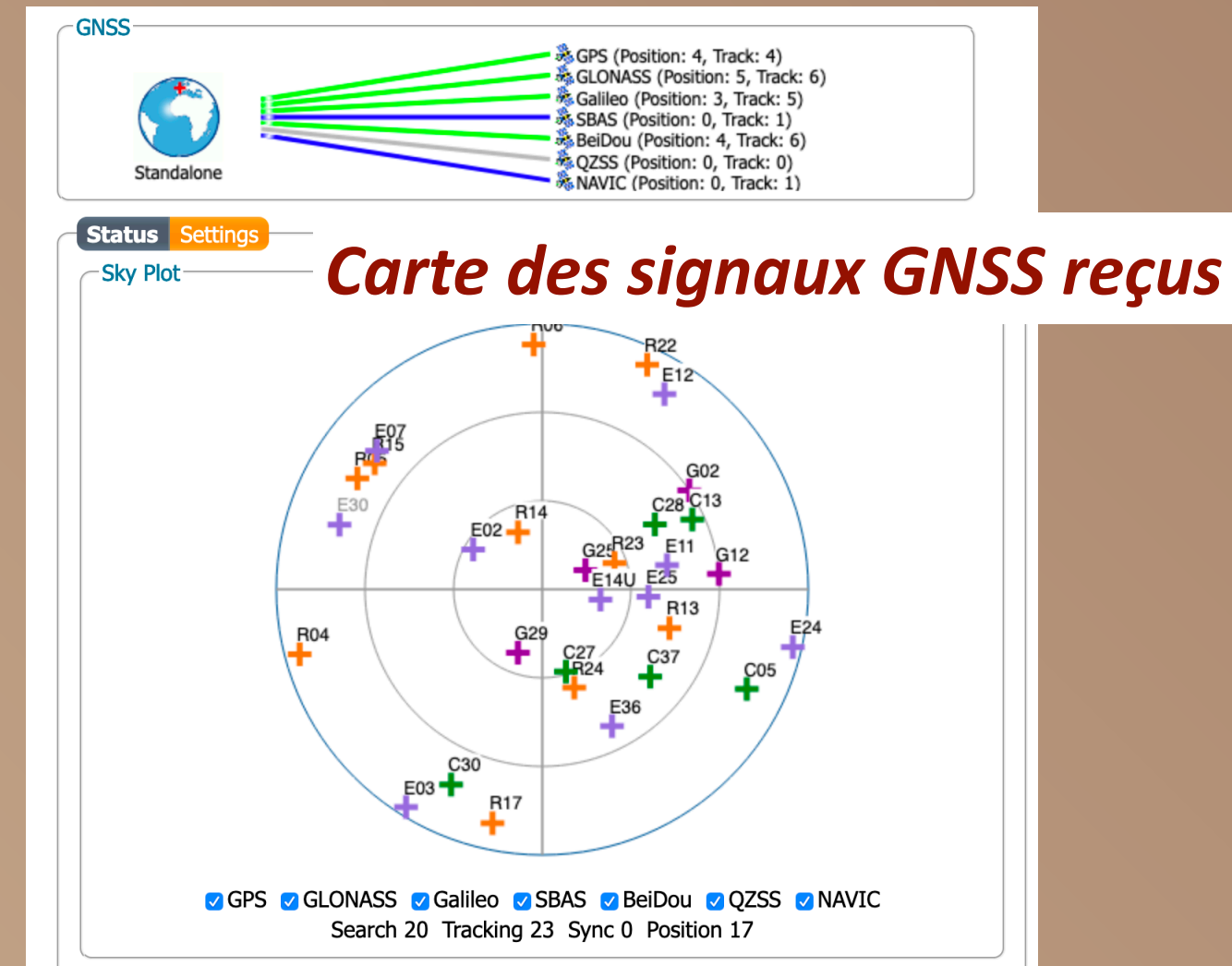
► Distribution d'horloges

► 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