

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°2 : 25 mai 2022



Hyper-Kamiokande

Plan de la présentation

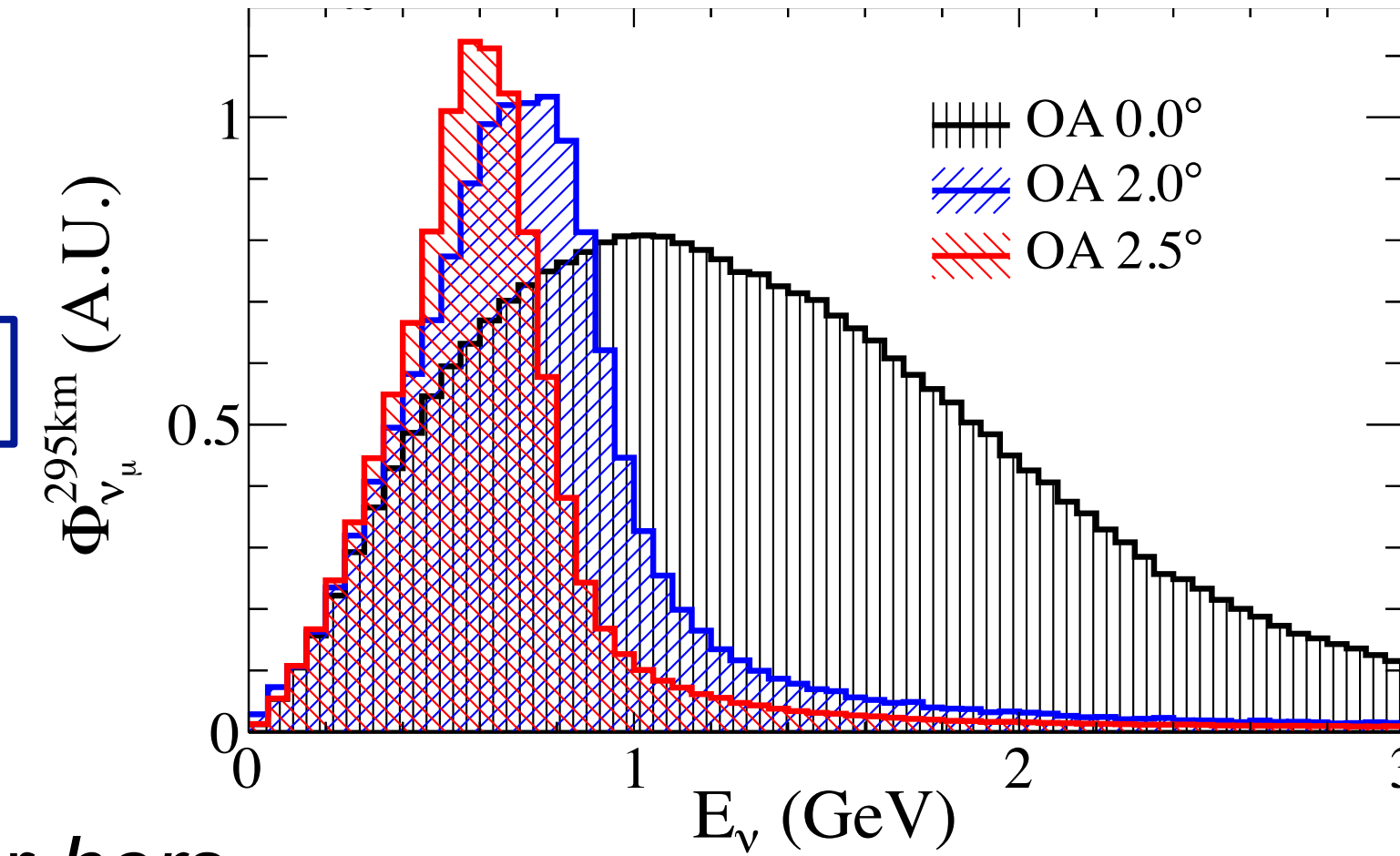
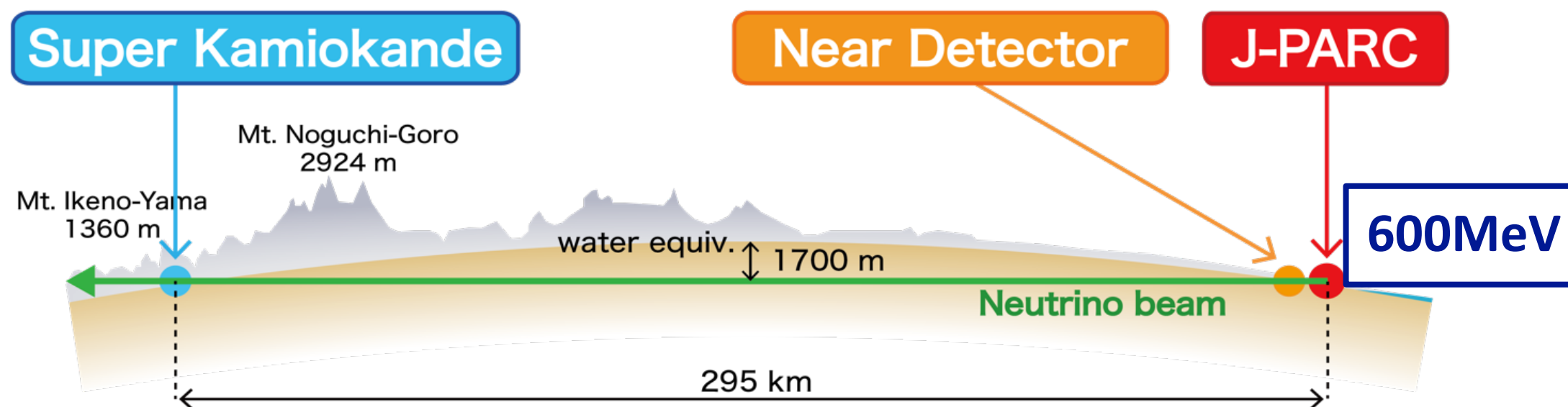
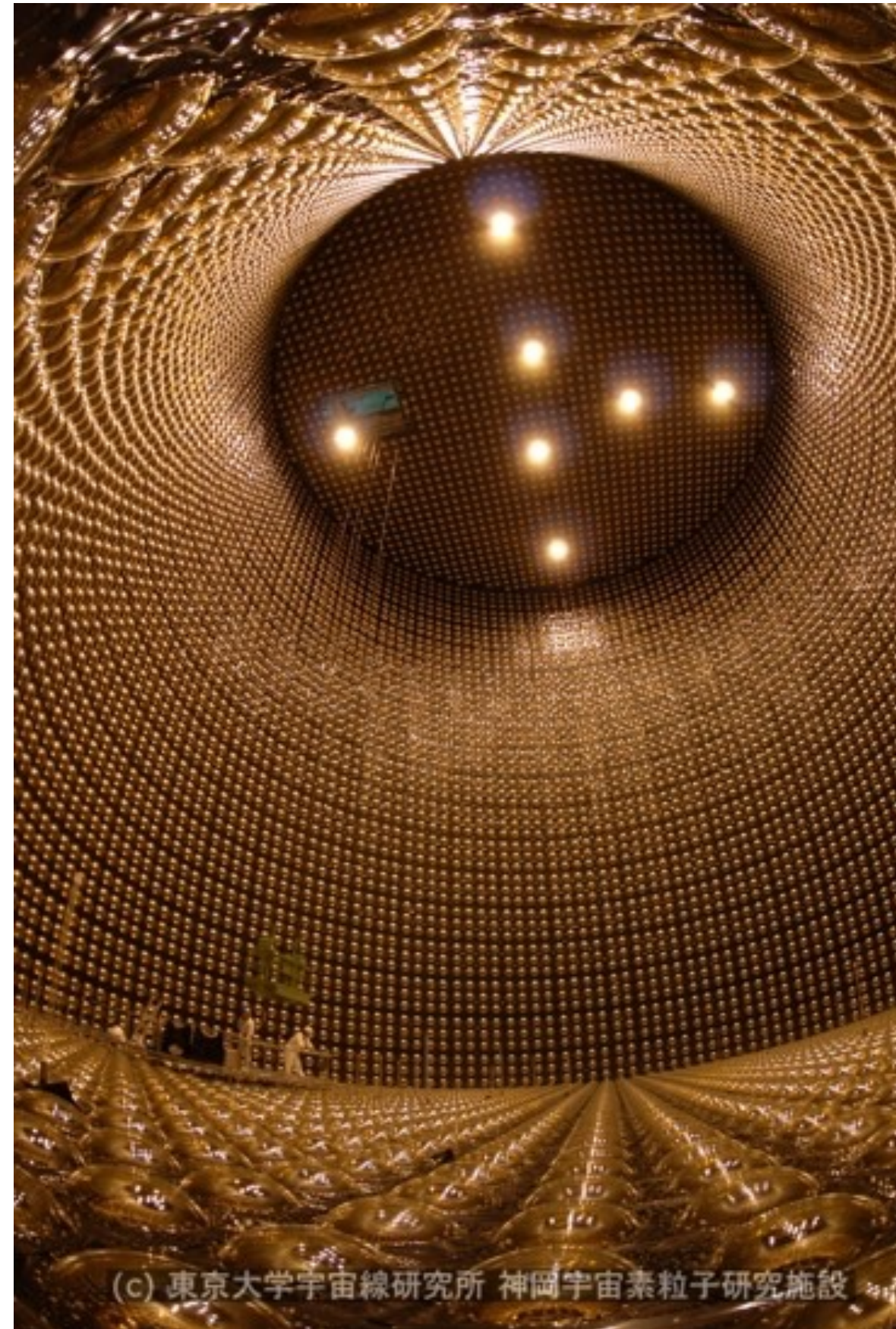
- ▶ Rappel sur l'analyse avec P-theta dans T2K
- ▶ Travail sur le paramètre de l'énergie de liaison du nucléon
- ▶ Etudes pour l'analyse 2021/2022
- ▶ R&D pour Hyper-Kamiokande
- ▶ Etude de temps de vol des neutrinos

Formation
Autres activités
Perspectives et conclusion

Rappels sur T2K

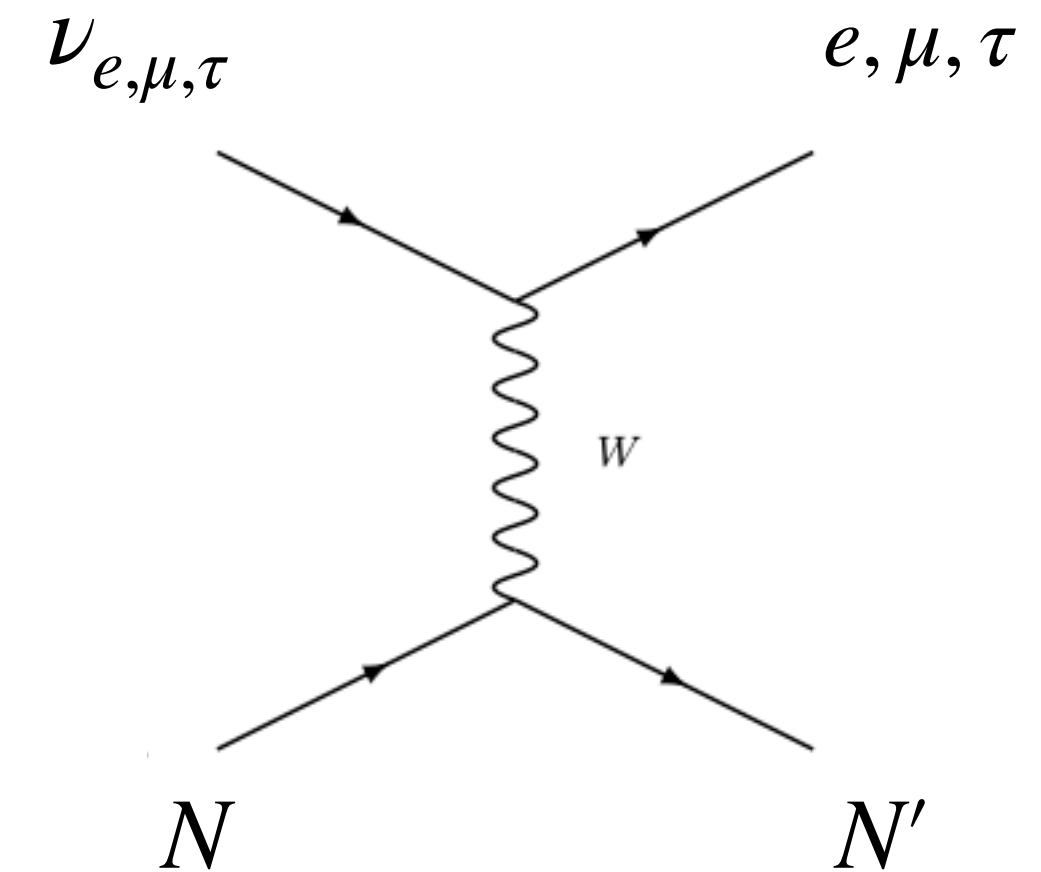
Super-Kamiokande (1996), Mine Mozumi (1000m), Kamioka, Japon

Tokai to Kamioka (2010)



41 m

- Super-Kamiokande (SK)
- Détection de la lumière Cherenkov, détecteur *hors-axe*:
 - 50 kTonnes d'eau (+ Gd)
 - 11000 tubes photo-multiplicateurs (PMT)
- Lepton ID + kinematics reconstruction
→ neutrino kinematics + stat

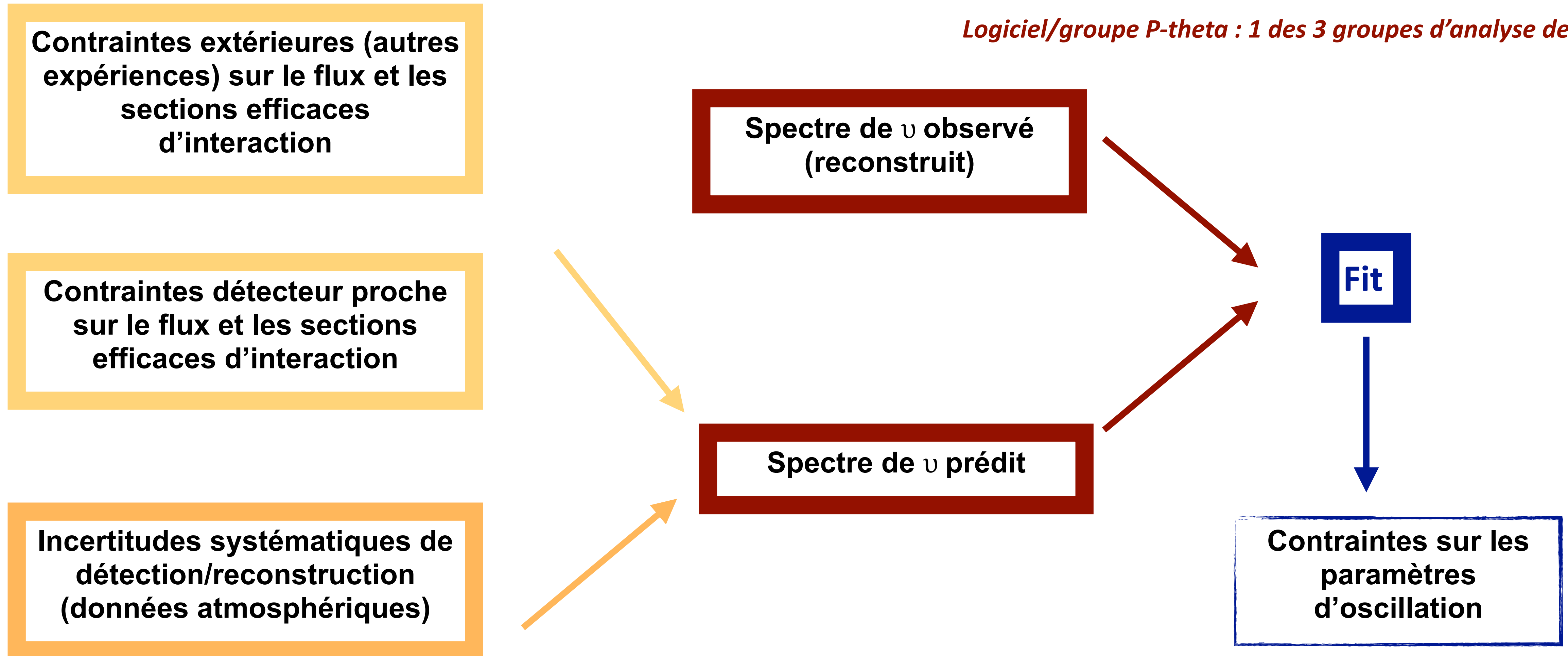


Main interaction : Charged current quasi elastic (CCQE)

$$E_{rec}^{CCQE} = \frac{m_p^2 - (m_n - E_b)^2 - m_l^2 + 2(m_n - E_b)E_l}{2(m_n - E_b - E_l + p_l \cos \theta_l)}$$

Analyse avec P-theta

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



Analyse avec P-theta

Dans les détails :

Vraisemblance (Loi de Poisson) bin à bin

Marginalisation sur les jets de paramètres de nuisances

Boucle sur une grille de valeurs des paramètres étudiés

$$\begin{aligned} -\ln(L) &= - \sum_{bins} \ln(\text{Poisson}(N_{Pred,i}, N_{Obs,i})) \\ &\approx \sum_{bins} [+ (N_{Pred} - N_{Obs}) + N_{Obs} \times \ln(\frac{N_{Obs}}{N_{Pred}})] \end{aligned}$$

6 'échantillons' d'analyse : nue1R, numu1R, nuebar1R, numubar1R, nue1de, numucc1pi

Travail sur le paramètre de l'énergie de liaison du nucléon

$$E_{rec}^{CCQE} = \frac{m_p^2 - (m_n - E_b)^2 - m_l^2 + 2(m_n - E_b)E_l}{2(m_n - E_b)E_l + p_l \cos \theta_l}$$

- Améliorer la sensibilité de l'analyse : améliorer notre connaissance des effets systématiques
- E_b : Energie de liaison du nucléon (Interactions CCQE)
- Impacts sur la reconstruction et la prédiction



- Pas de détection de l'état hadronique après interaction (à SK) : E_b est estimée \rightarrow paramètre d'erreur systématique
- Besoin de s'appuyer sur un modèle nucléaire (fonctions spectrales): valeur de E_b indépendante de la cinématique du lepton sortant
- Autres modèles (RMF: Relativistic Mean-Field Model): prédiction d'une forte corrélation avec Q^2 (3-momentum transfer) \rightarrow ajout à l'incertitude

Travail sur le paramètre de l'énergie de liaison du nucléon

$$Q_3 = \sqrt{p_\nu^2 + p_l^2 + p_\nu p_l \cos\theta}$$

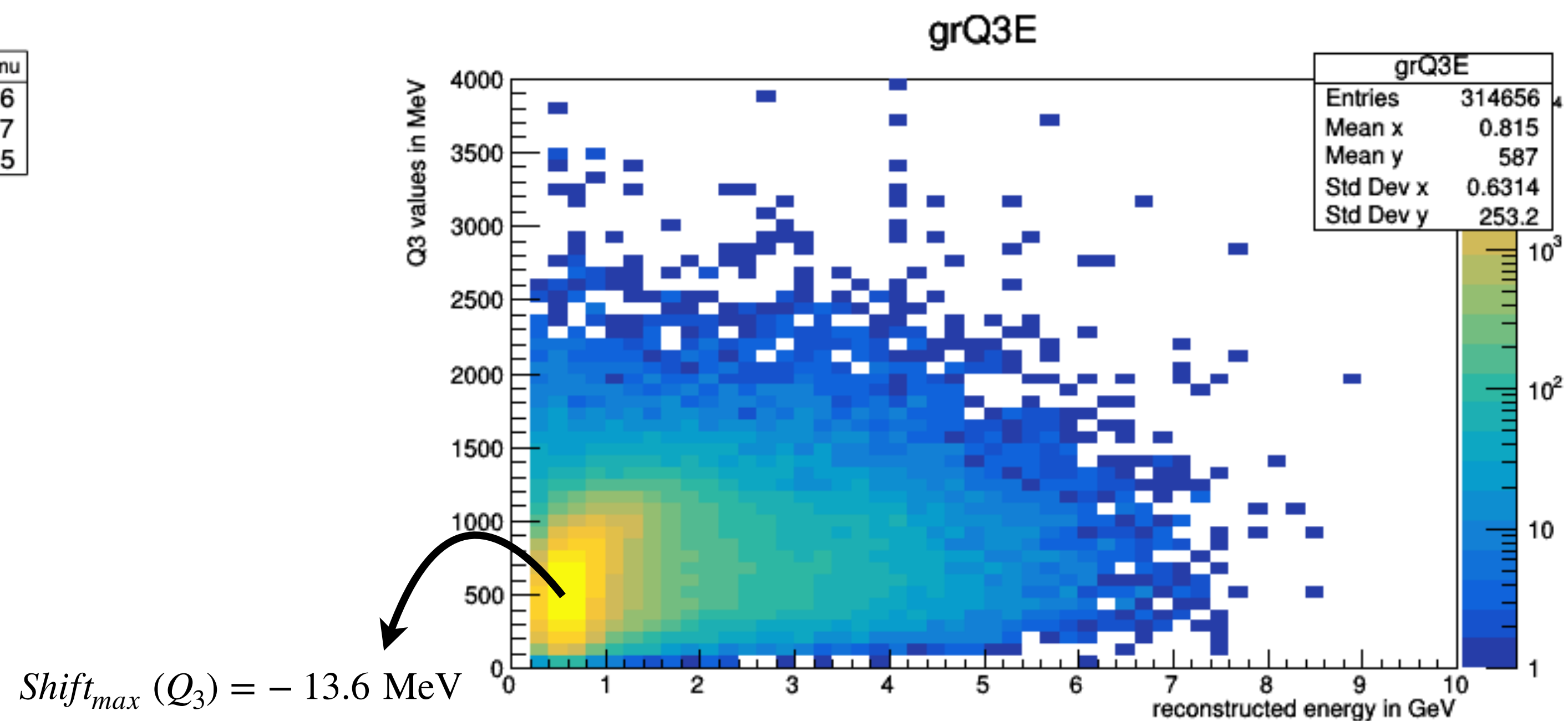
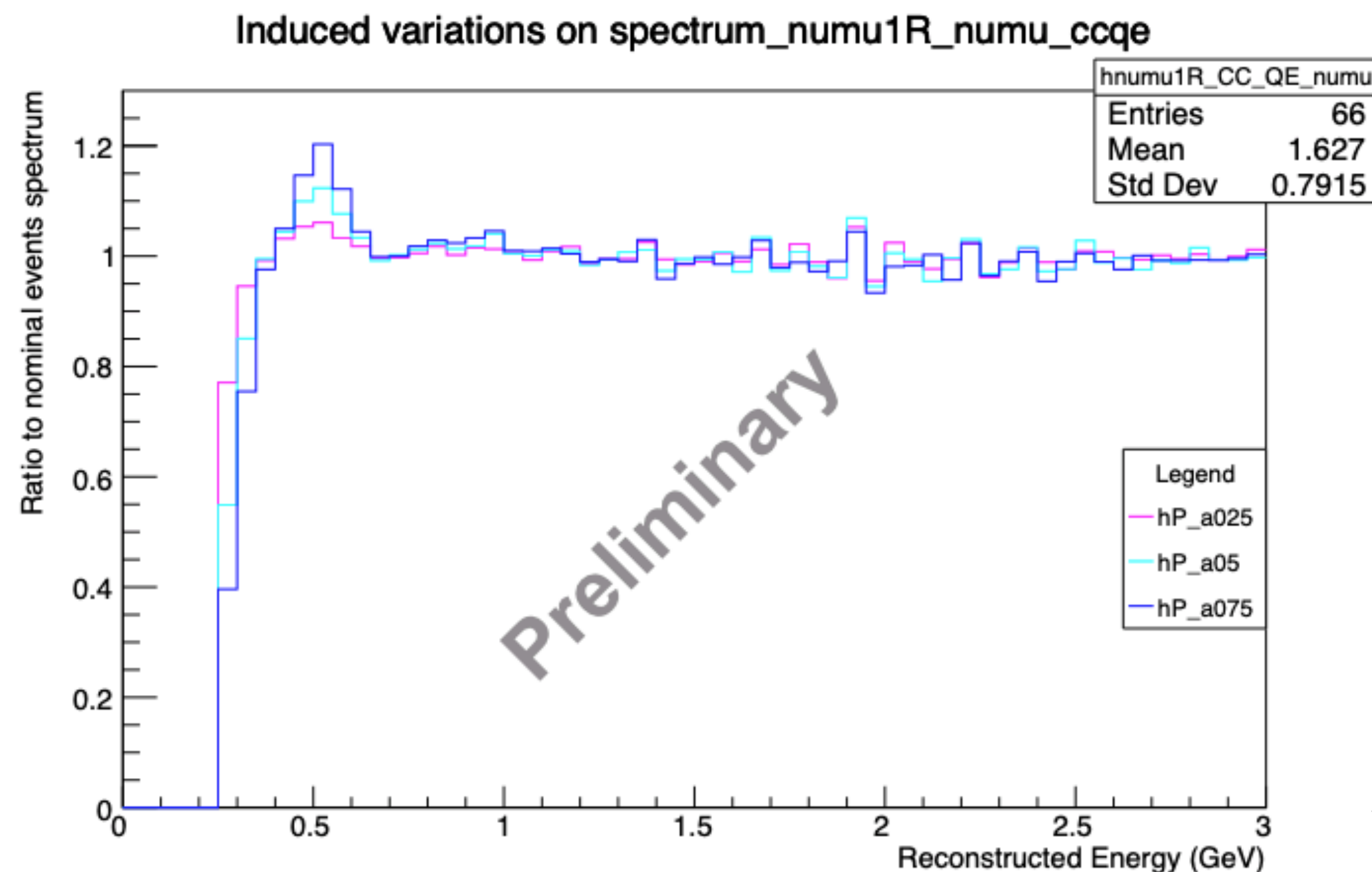
$$\text{Shift}(Q_3) = m * Q_3 + c$$

m et c constantes, estimées par un ajustement extérieur

Force de la correction: [facteur \$\alpha\$](#)

Dépendance en $Q_3 \rightarrow$ décalage de la valeur estimée de E_b

$$E_{B_{nominal}} = 27 \text{ MeV}$$



► Suite : impact de alpha à une valeur extrême sur l'analyse

Etudes pour l'analyse 2021/2022

Etude de l'impact du choix de modèles d'interaction à partir de fausses données :

But : estimer l'impact d'utiliser un modèle d'interaction dans l'ajustement qui n'est le « vrai » modèle dans les conditions de l'analyse (en terme de statistiques, systématiques, etc...)

- Production de « fausses données » en appliquant des poids au MonteCarlo nominal : on mimique le cas : les données viennent d'un 'vrai' modèle qui est alternatif
- Exécute l'analyse en ajustement à notre modèle « habituel »

Si les différences ne sont pas absorbés suffisamment par nos systématiques (notamment pour Δ_m^2) , càd, si le biais au nominal dépasse certains critères : on élargit les intervalles de confiances dans le résultat de l'analyse

Note technique T2K en cours de revue.

Etudes pour l'analyse 2021/2022

Liste des études pour l'analyse 2021 :

LFG et CRPA : modèles nucléaires alternatifs pour CCQE

LowQ2 : modèle de production d'un pion à l'état final pour Q2 faible

Non-QE : grande liberté donnée par les paramètres d'incertitude sur Q2 pour CCQE peut accidentellement cacher une erreur sur le modèle non-QE → assigne ces variations au modèle non-QE à la place

SPPAdversarial : prise en compte de la cinématique du pion pour l'échantillon 1Re1de (au détecteur lointain)

Corrections radiatives : lepton sortant peut émettre un photon qui mimique un électron (anneau supplémentaire ou brouillé)

3comp et Zexp : facteur de forme alternatif pour la section efficace de CCQE

Pion hadron kinematics : incertitudes sur les éléments de matrice de la résonance pour la production d'un pion à l'état final

EB15MeV : test extrême sur le paramètre EB (nominal = 27MeV)

Martini : Modèle alternatif d'interactions neutrino/nucléon avec pion dans l'état final

- **SFtoLFG et SFtoCRPA**
- **LowQ2SPP**
- nonQE
- **SPP Adversarial**
- **Radiative corrections**
- Z expansion
- 3comp CCQE
- **Pion hadron kinematics**
- **EB 15MeV**
- RStoMartini

Etudes pour l'analyse 2021/2022

Exemple : Corrections radiatives

Les leptons sortants peuvent émettre un photon

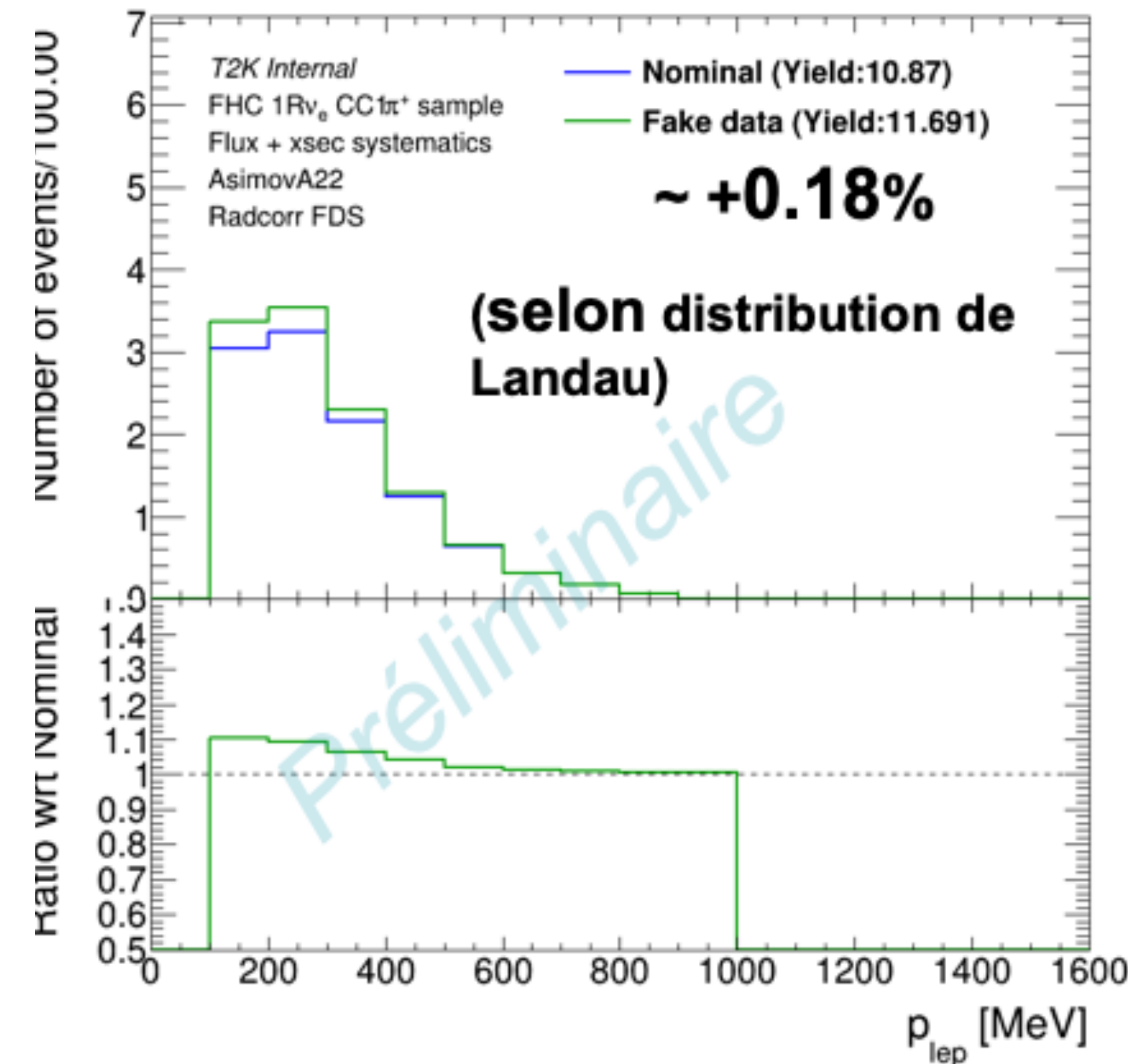
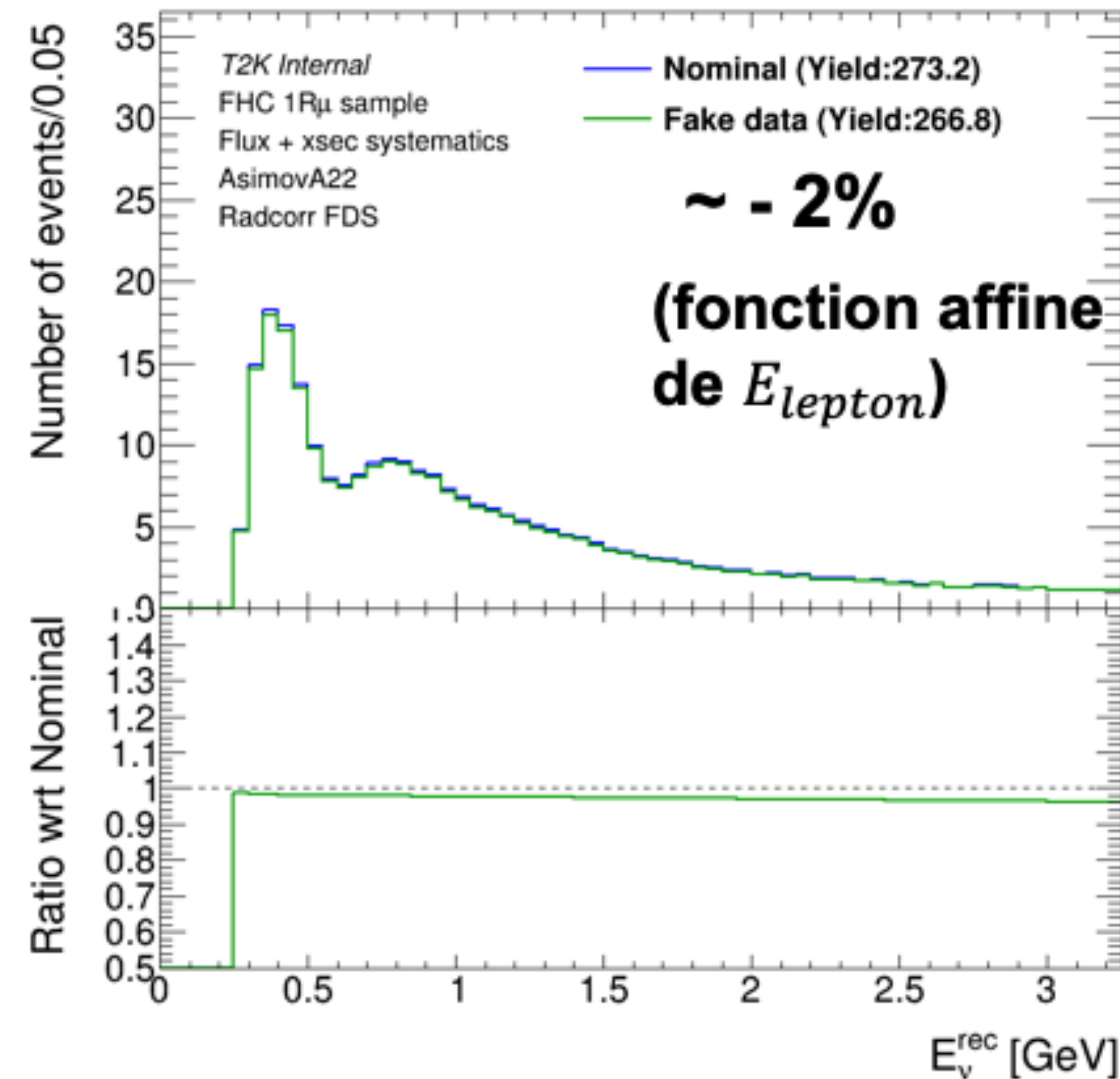
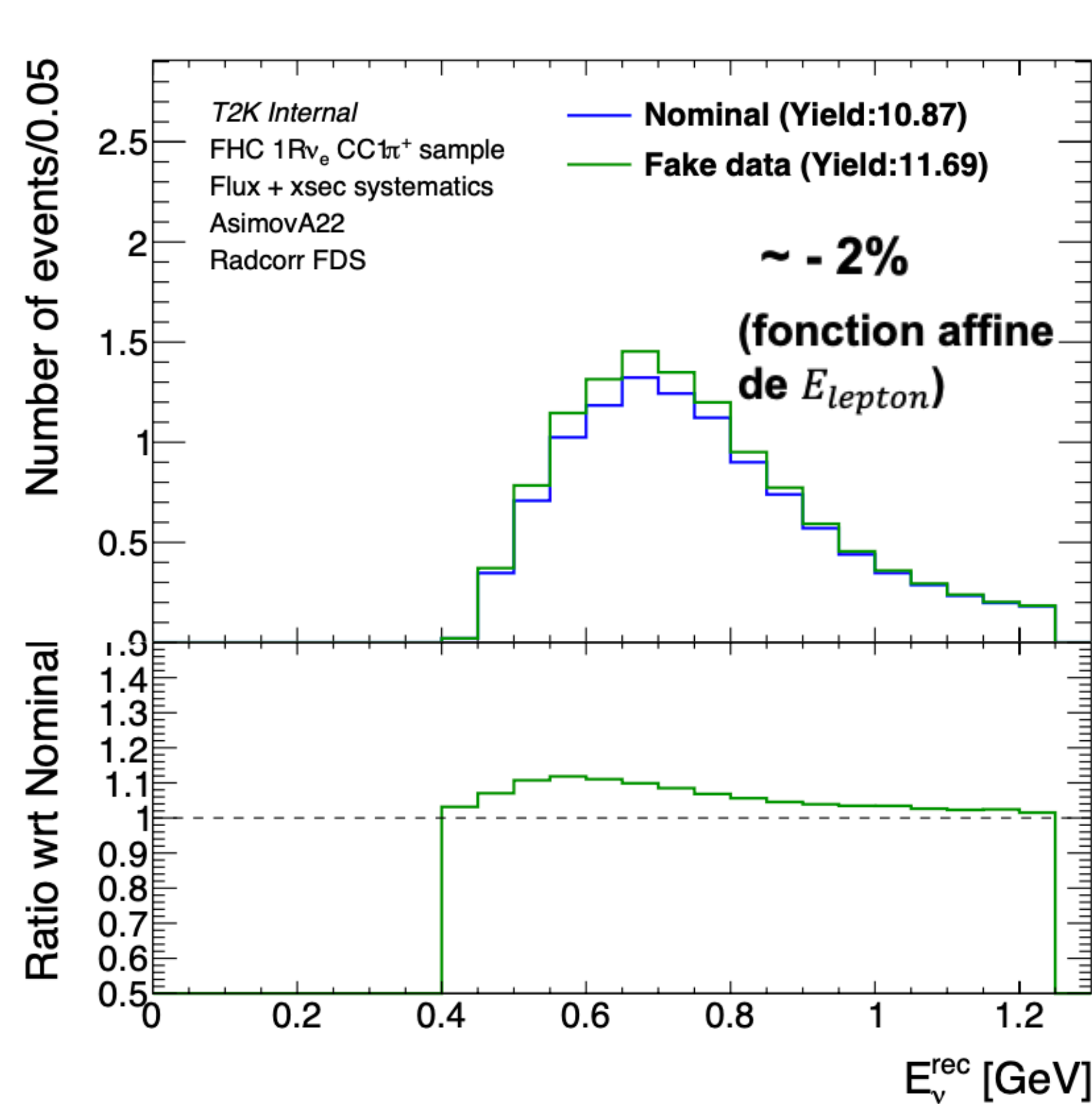
➡ Mauvaise identification à SK

➡ Muon + photon colinéaire : imitent un electron

➡ Photon non-colinéaire : deuxième anneau Cerenkov

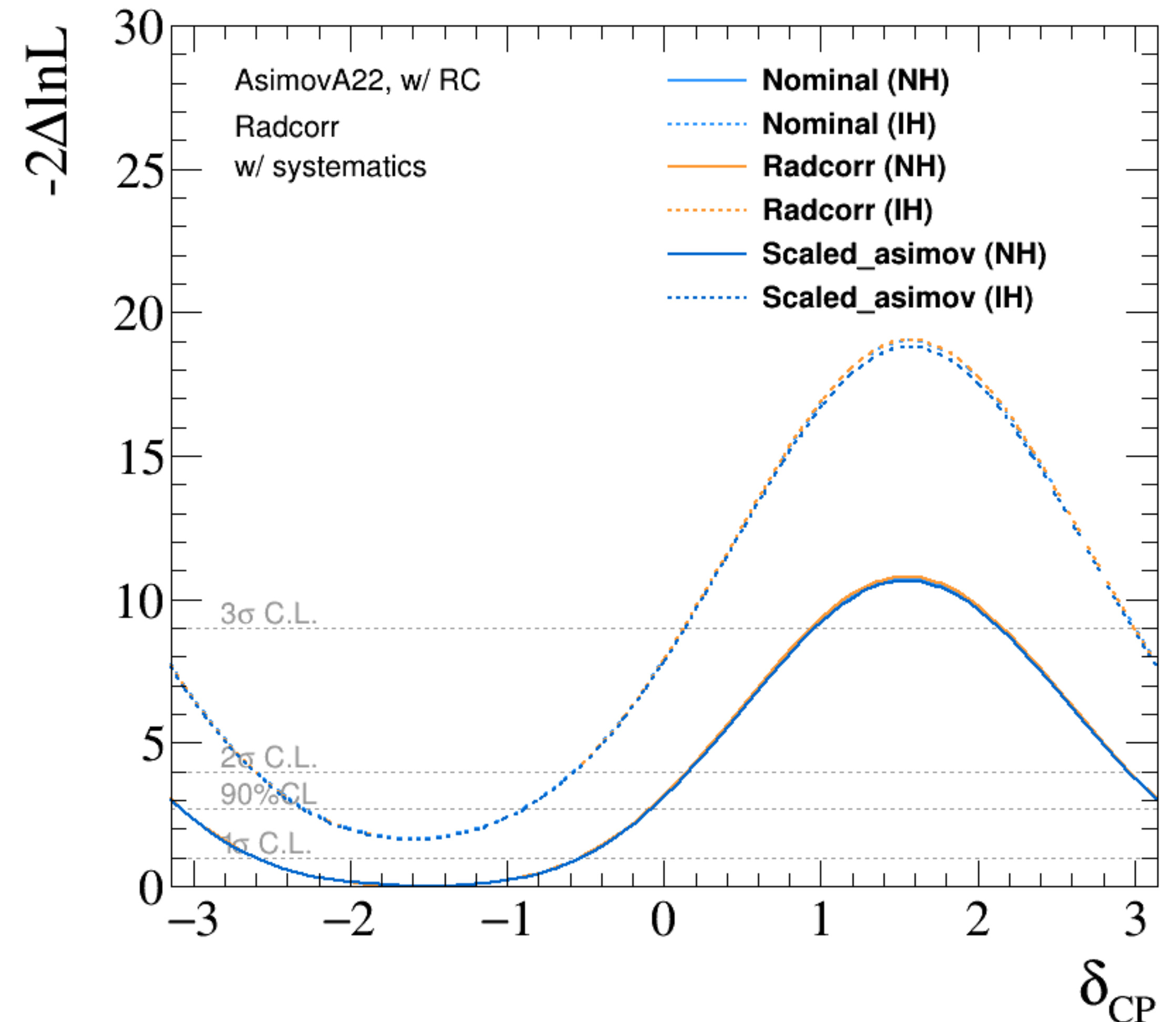
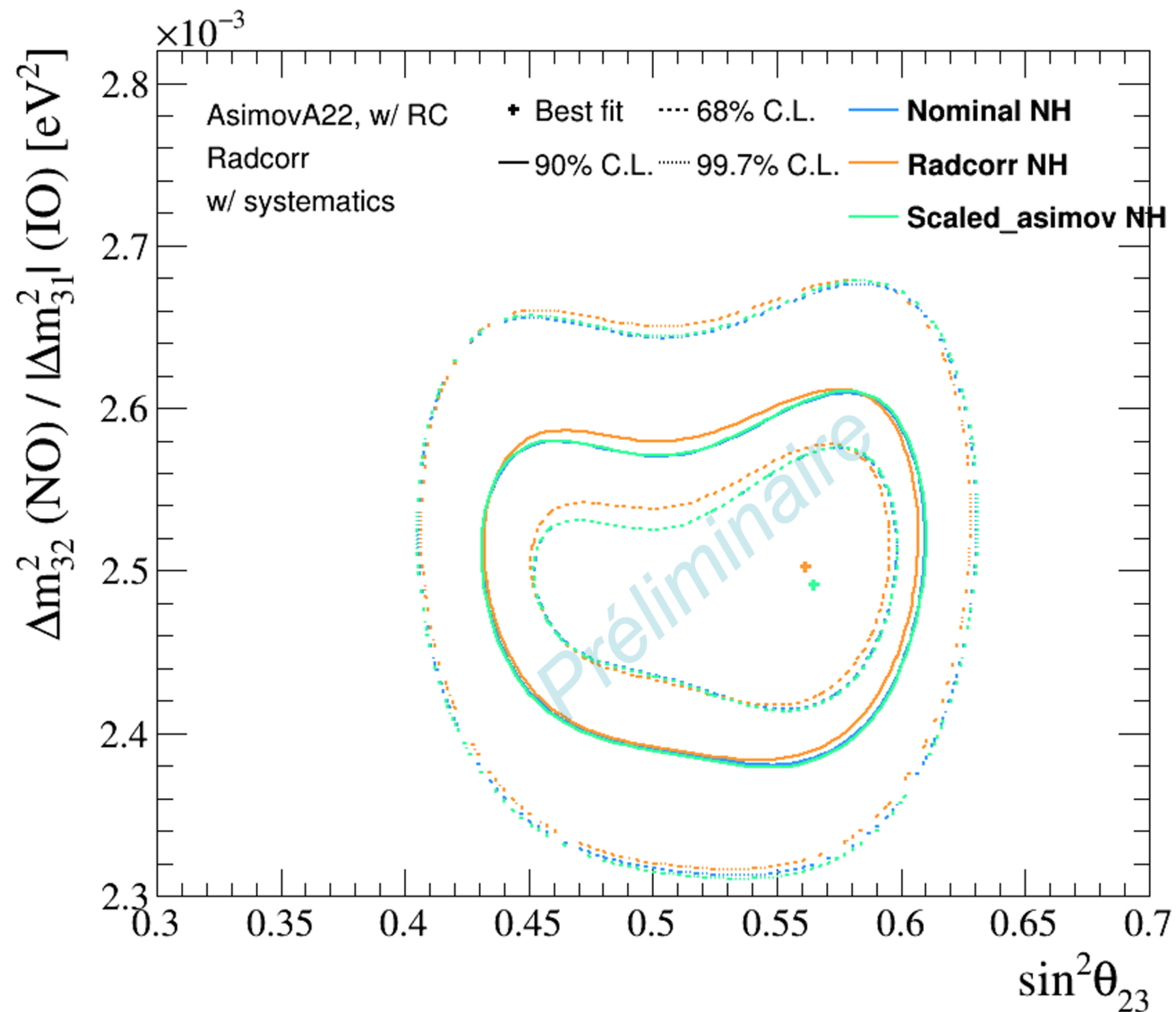
Etudes pour l'analyse 2021/2022

Exemple : Corrections radiatives



Etudes pour l'analyse 2021/2022

Exemple : Corrections radiatives



Etudes pour l'analyse 2021/2022

Nominal et « scaled Asimov » (Nominal re-normalisé)

Changements du milieu et de la largeur de l'intervalle à 2σ

$\sin^2\theta_{23}$: pas d'impact significatifs, sinon 'smearing'

Δm_{32}^2 : 'smearing' des contours publiés

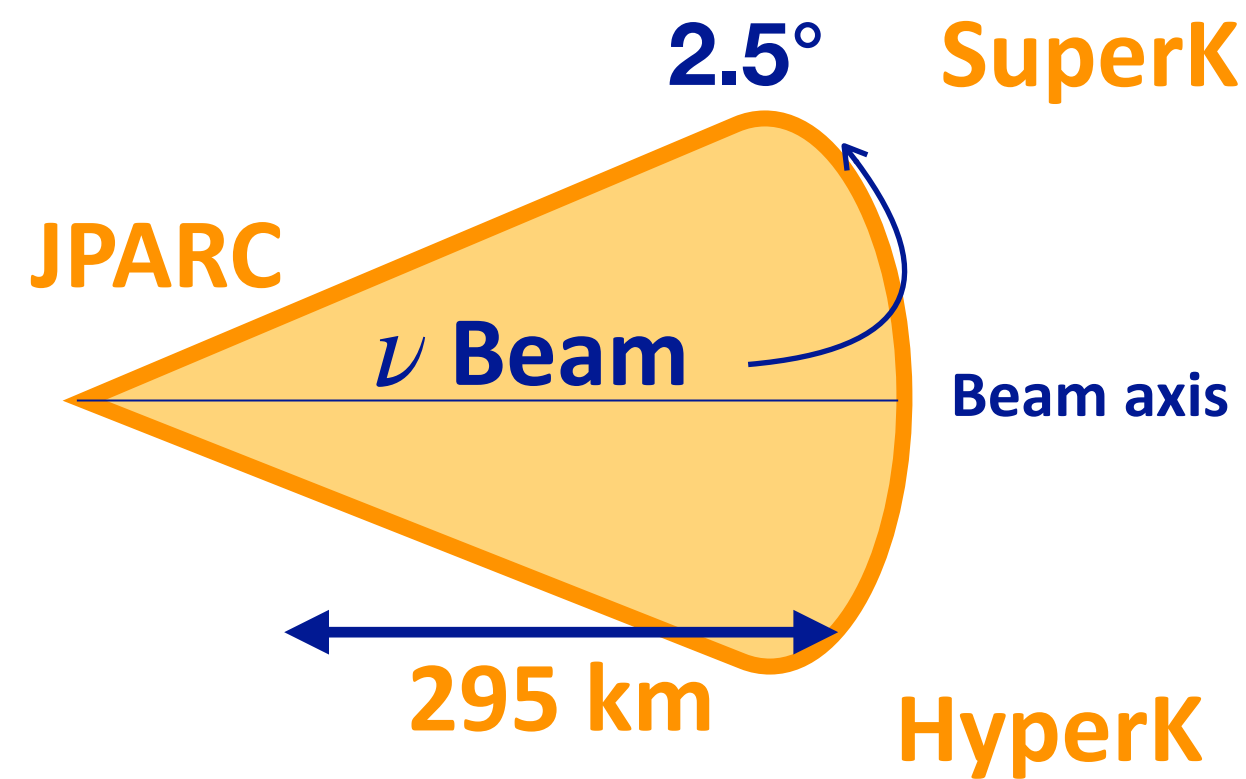
δ_{CP} : pas de changement de conclusion sur l'exclusion de $\delta_{CP} = 0$ à 90%

	$\sin^2\theta_{23}$	Δm_{32}^2	δ_{CP}
Ratio de largeur de l'intervalle à 2σ	0.979	0.985	0.995
Biais du milieu de l'intervalle à 2σ	-7.36%	16.9%	-0.892%

► Suite : Faire le fit +smearing soi même pour la thèse ?

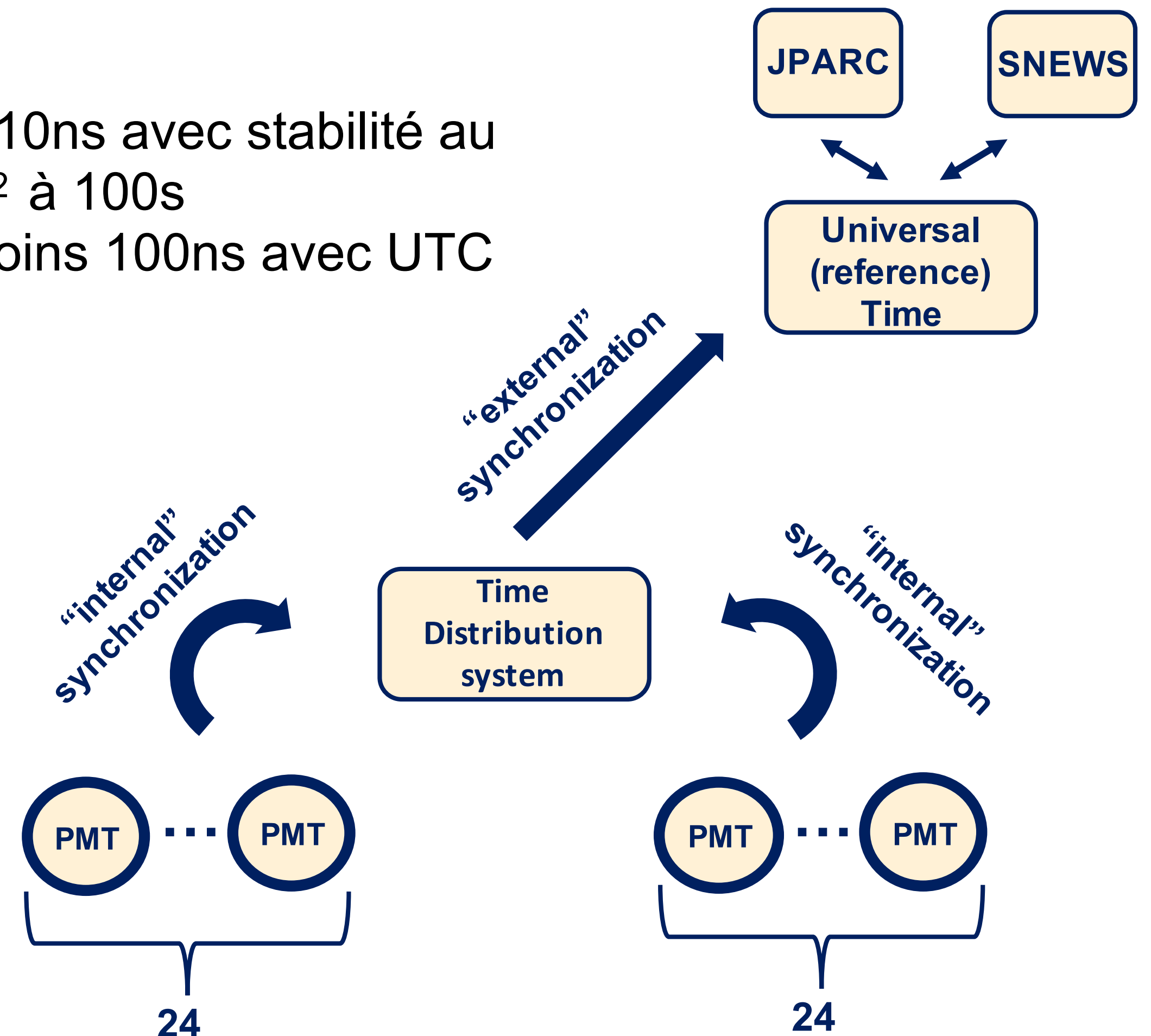
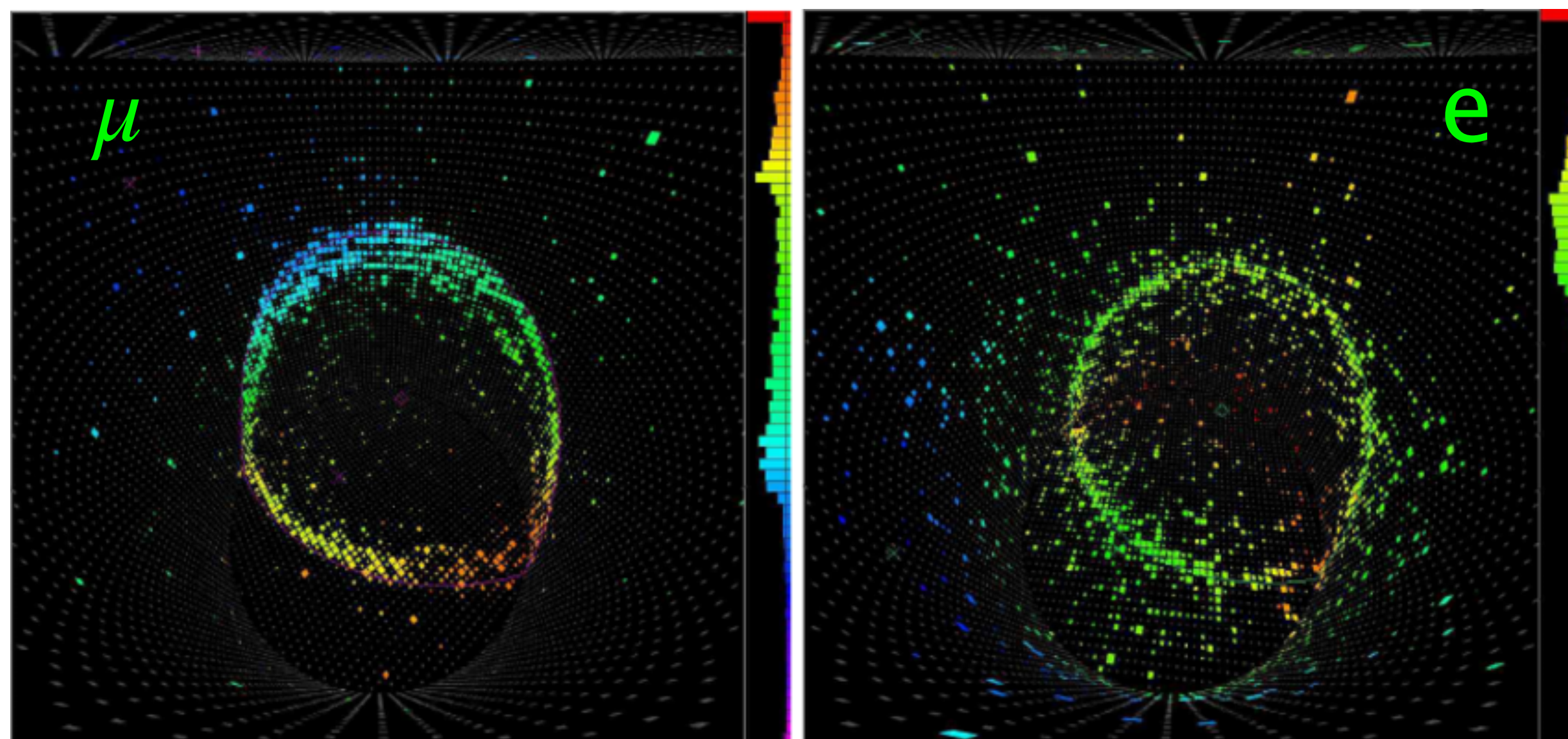
R&D pour Hyper-Kamiokande

Début de la prise de donnée prévu en 2027

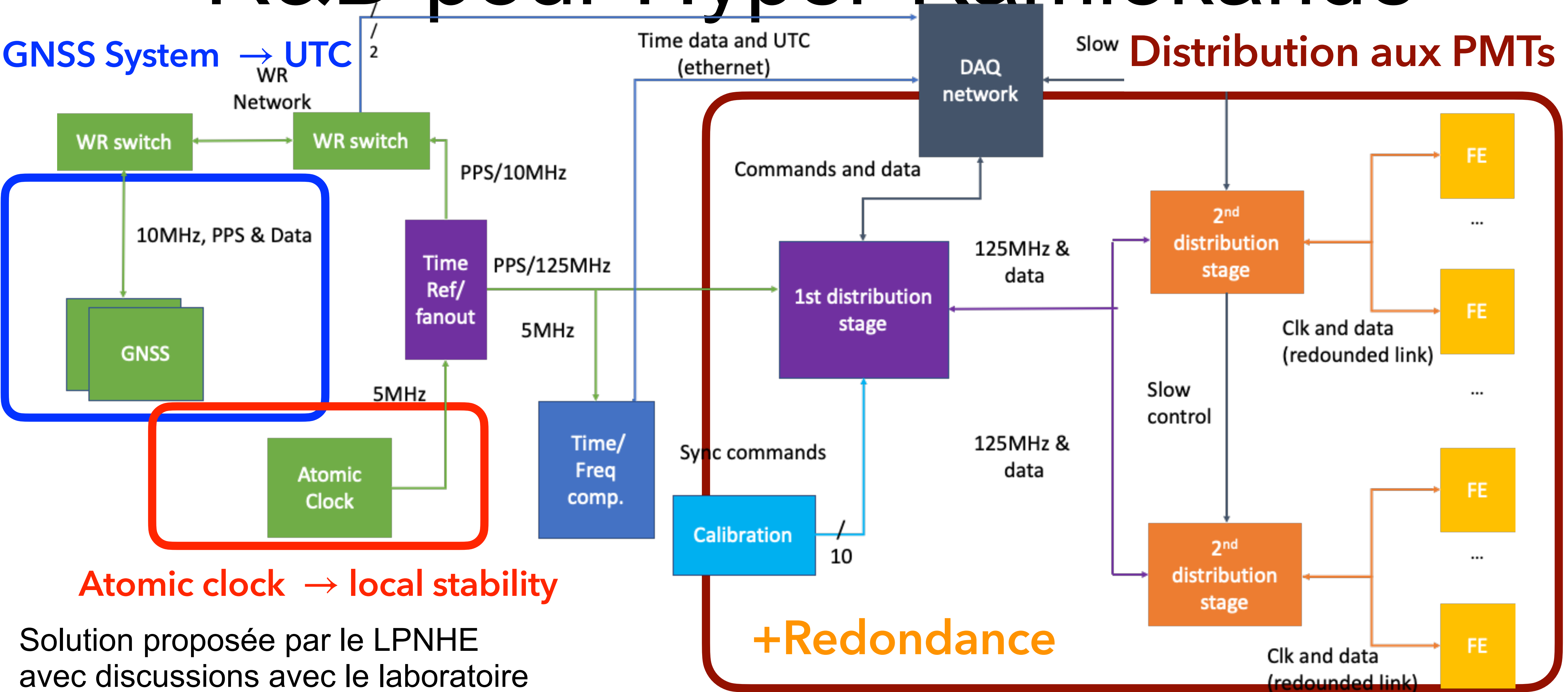


Cahier des charges :

- Interne : Distribution en 10ns avec stabilité au moins à 10^{-11} à 1s et 10^{-12} à 100s
- Externe : accord à au moins 100ns avec UTC



R&D pour Hyper-Kamiokande



Solution proposée par le LPNHE
avec discussions avec le laboratoire
du Syrte

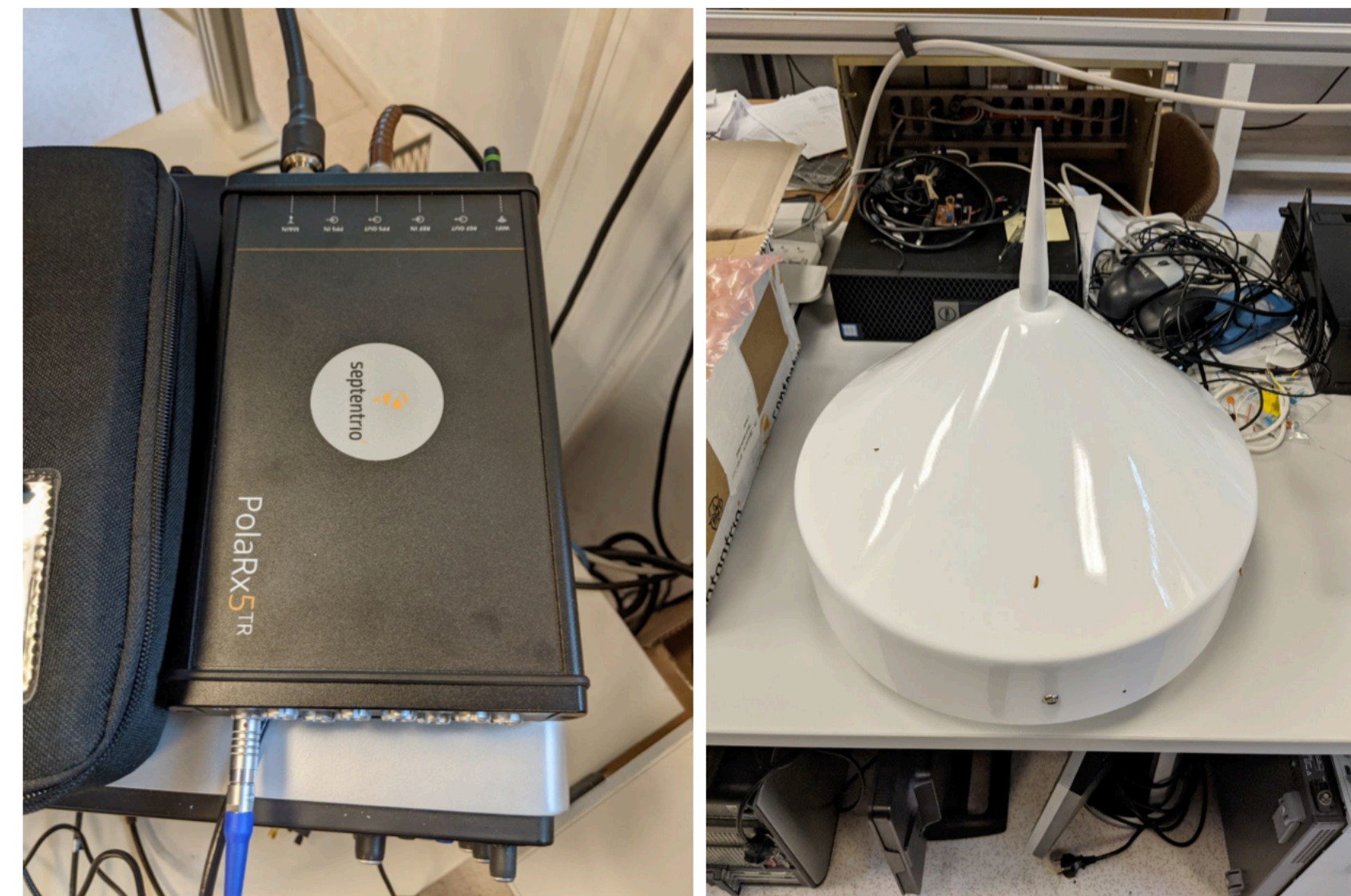
R&D pour Hyper-Kamiokande

Horloge atomique au Rubidium : stabilité du temps local
(+ tard : Tests maser à hydrogène passif)

Antenne + récepteur GNSS (= GPS + autres constellations)

—> installés sur le toit de la tour 13 + local technique au 5ème étage

+ fibre optique venant du SYRTE avec 1pps de leur horloge de référence / calibration (en cours)

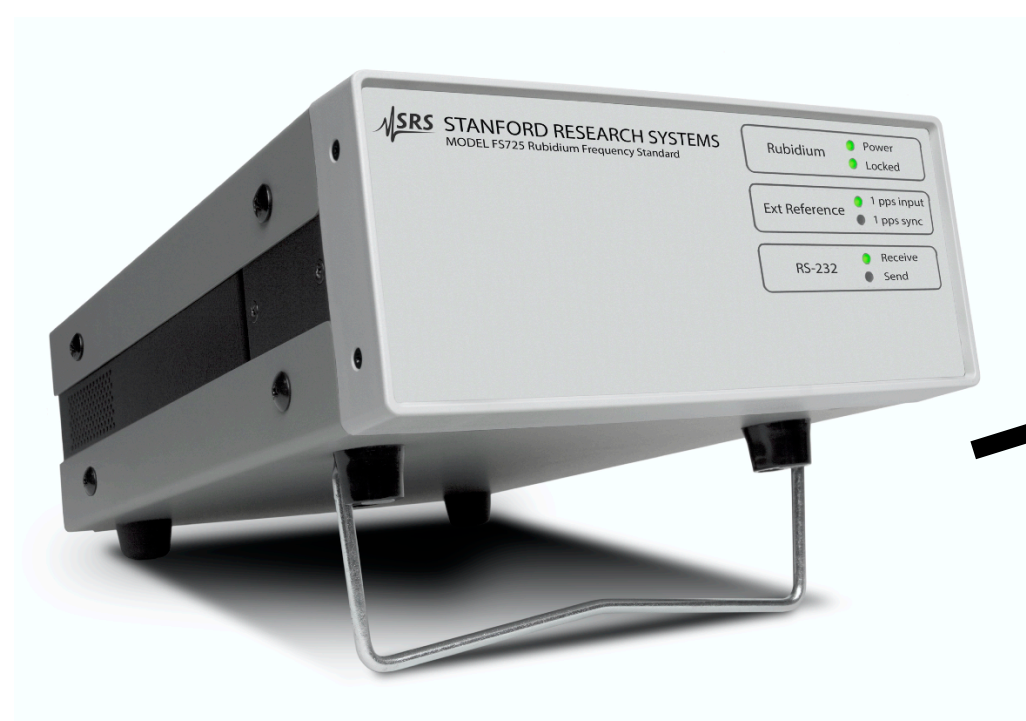


R&D pour Hyper-Kamiokande

Antenne Septentrio sur
le toit de la tour 13



Sortie de
l'antenne



PPS

10 MHz

L'un ou l'autre



Récepteur Septentrio

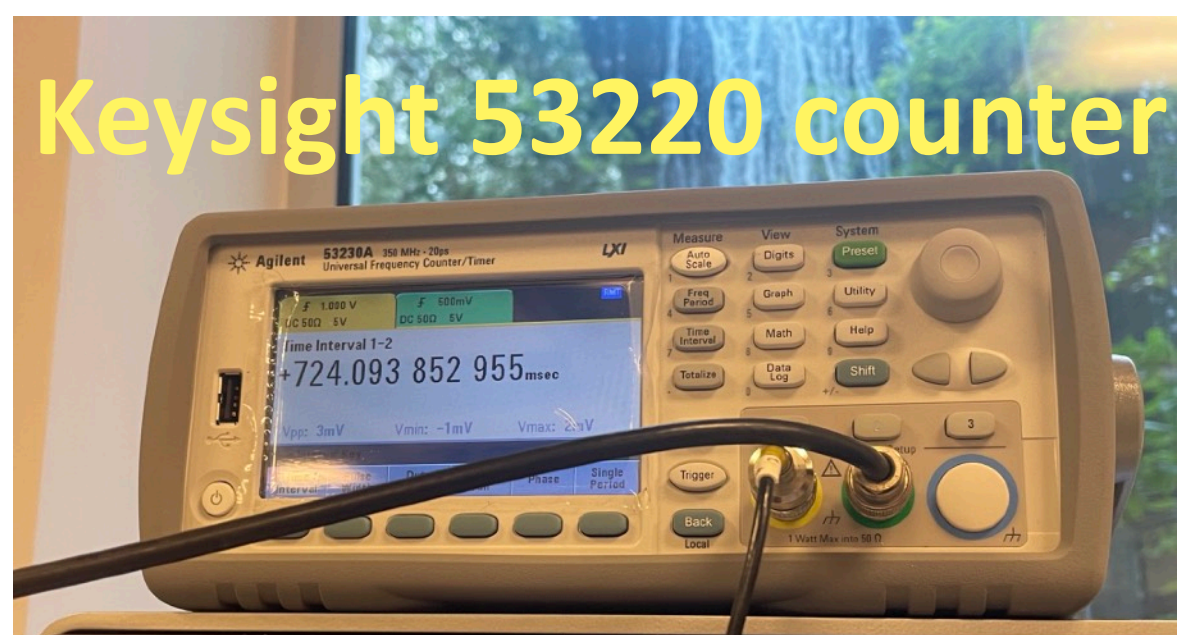
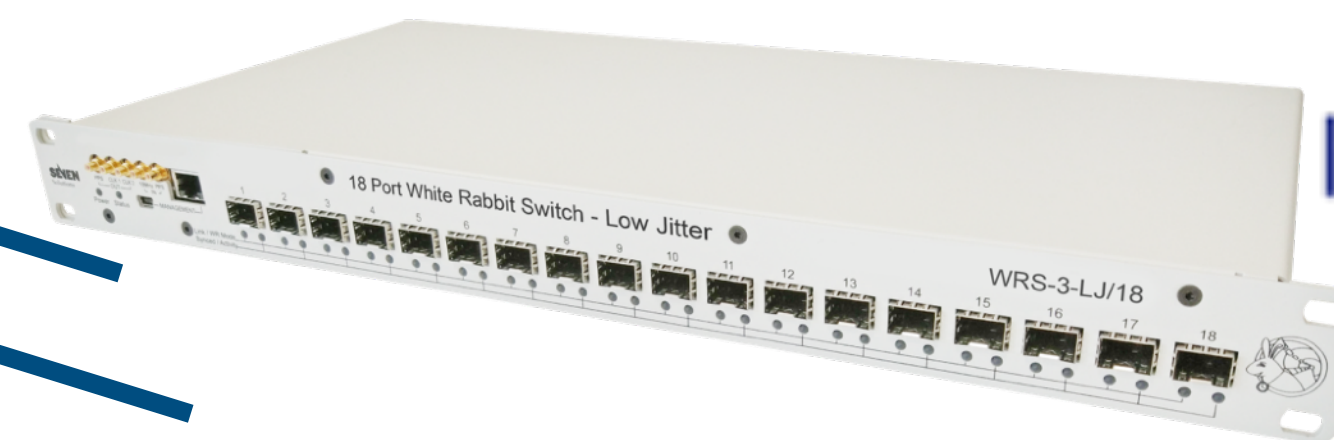
CGGTTS files :

- Name of satellite
- Elevation of satellite
- Starting date and time of tracking
- All info on applied atmospheric delays
- Ephemeris used for correction
- Other receiver info band, channel, ...)
- Time difference between input and GPS time in 0.1 ns

Signal calibré venant
par fibre optique et lien
« White Rabbit » du :

PPS

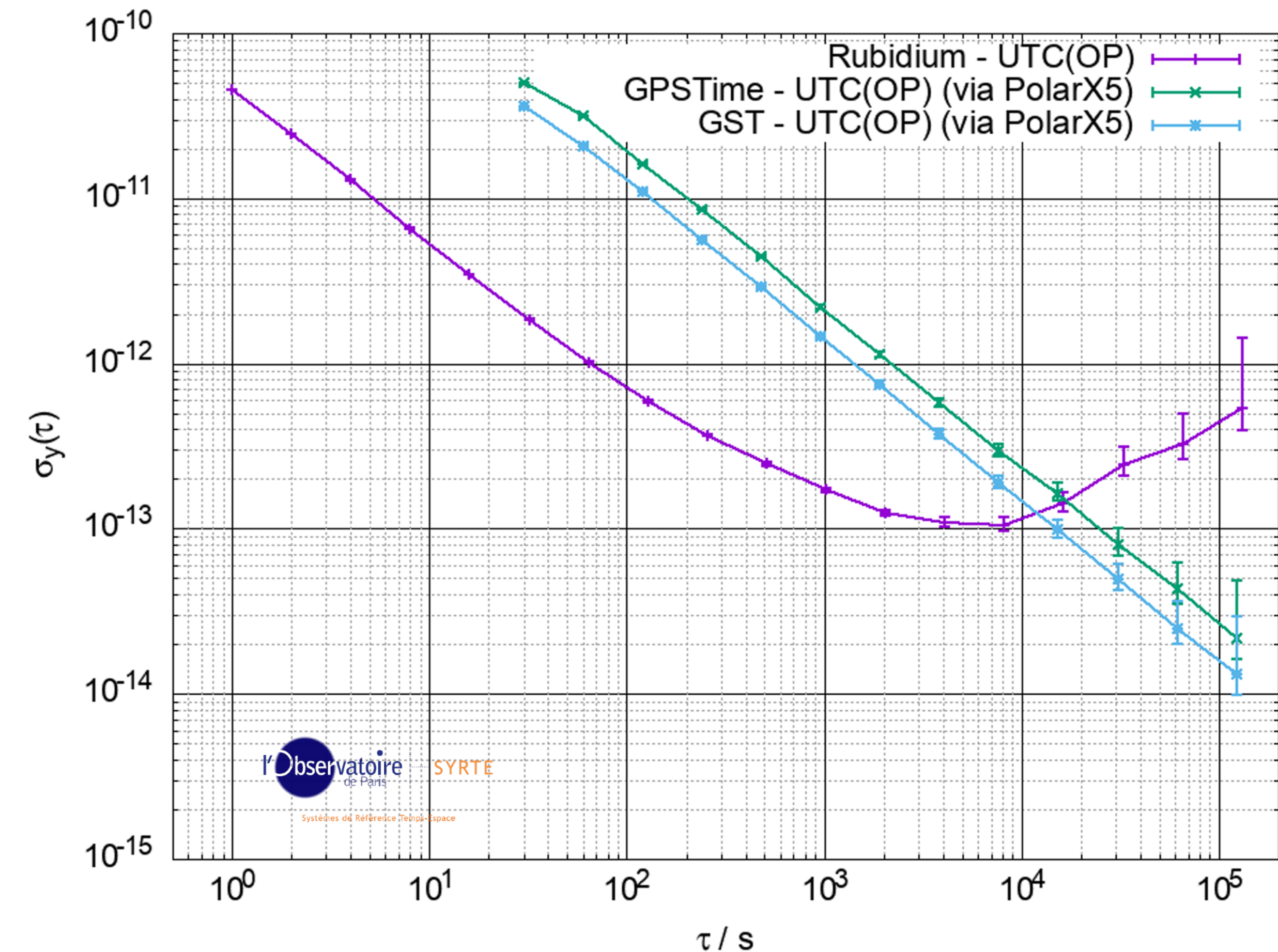
10 MHz



Keysight 53220 counter

Pour autres comparaisons

R&D pour Hyper-Kamiokande



Measured Allan Standard deviation for the chosen clock and GNSS receiver/antenna

Déviati n standard/variance de Allan

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle$$

Variance en fonction de la longueur de l'intervalle d'échantillonnage :
—> stabilité sur différentes échelles de temps

Besoin de combiner les performances d'une horloge atomique à court terme à celle du GPS à long terme

R&D pour Hyper-Kamiokande

Obtenir le temps UTC avec un récepteur GNSS :

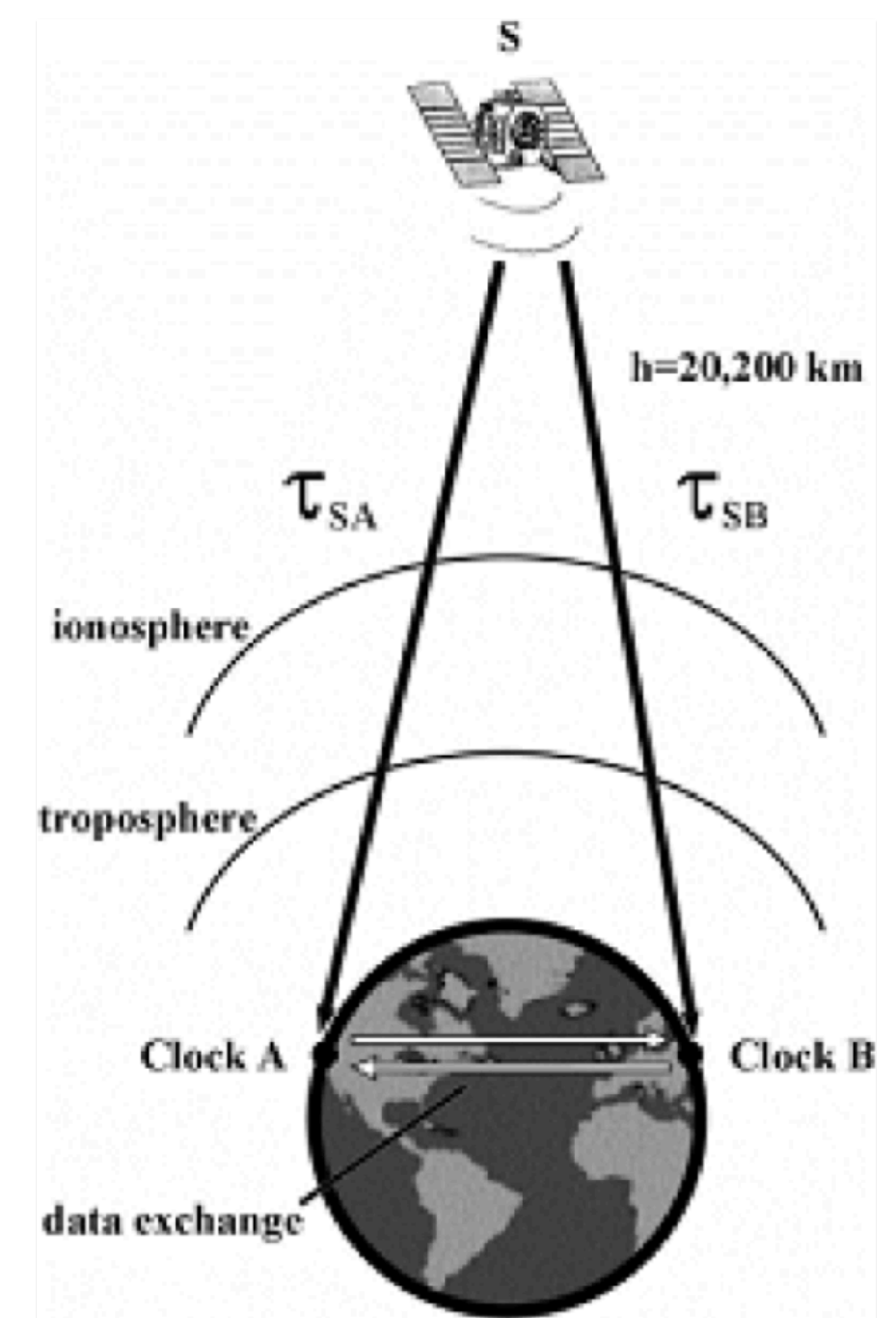
- Horloge interne du récepteur compte des cycles (à partir d'une calibration + délais, faite par le Syrte) + suivi de satellites sur 16mn → différence entre temps du récepteur et temps du GNSS pour chaque satellite vu au cours des 16mn écoulée (1 point /16mn) = Fichier CGGTTS (format spécifique)
 - Au laboratoire de référence : même chose entre horloge ultra précise de référence (point de ref en fait == UTC) et les satellites visibles
 - Transfert de temps par common view (logiciel) → différence notre récepteur/UTC
- Condition : connaître position exacte de notre antenne

Horloge interne du récepteur peu stable :

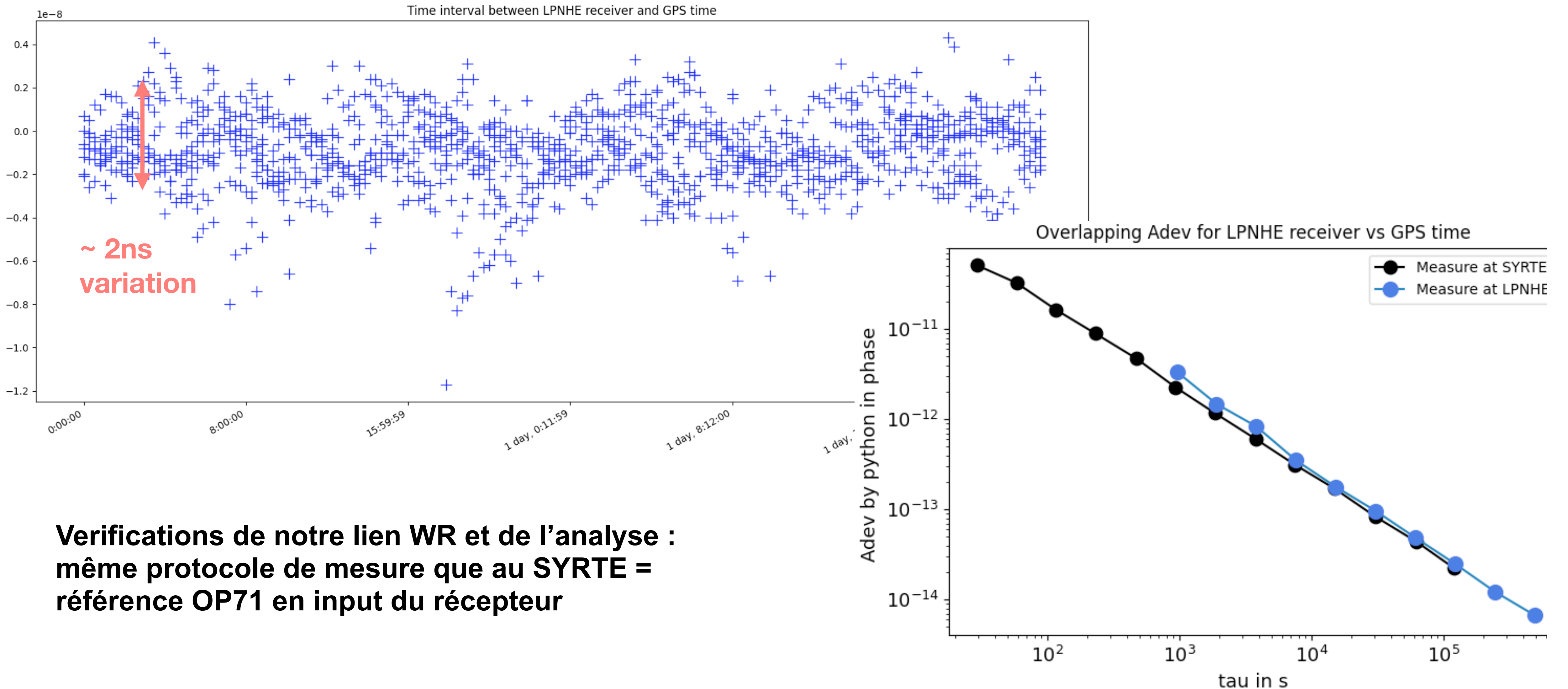
➡ Combinaison :

- 1) Asservissement de l'horloge atomique par le GPS avant distribution : non recommandé si peu de satellites sont disponibles (risque de sauts)
- 2) 10MHz de l'horloge en entrée du récepteur : bypass l'horloge interne

Peu de satellites en vue ou commun (HK : région montagneuse isolée)
Coupures de courants (conditions météorologiques)

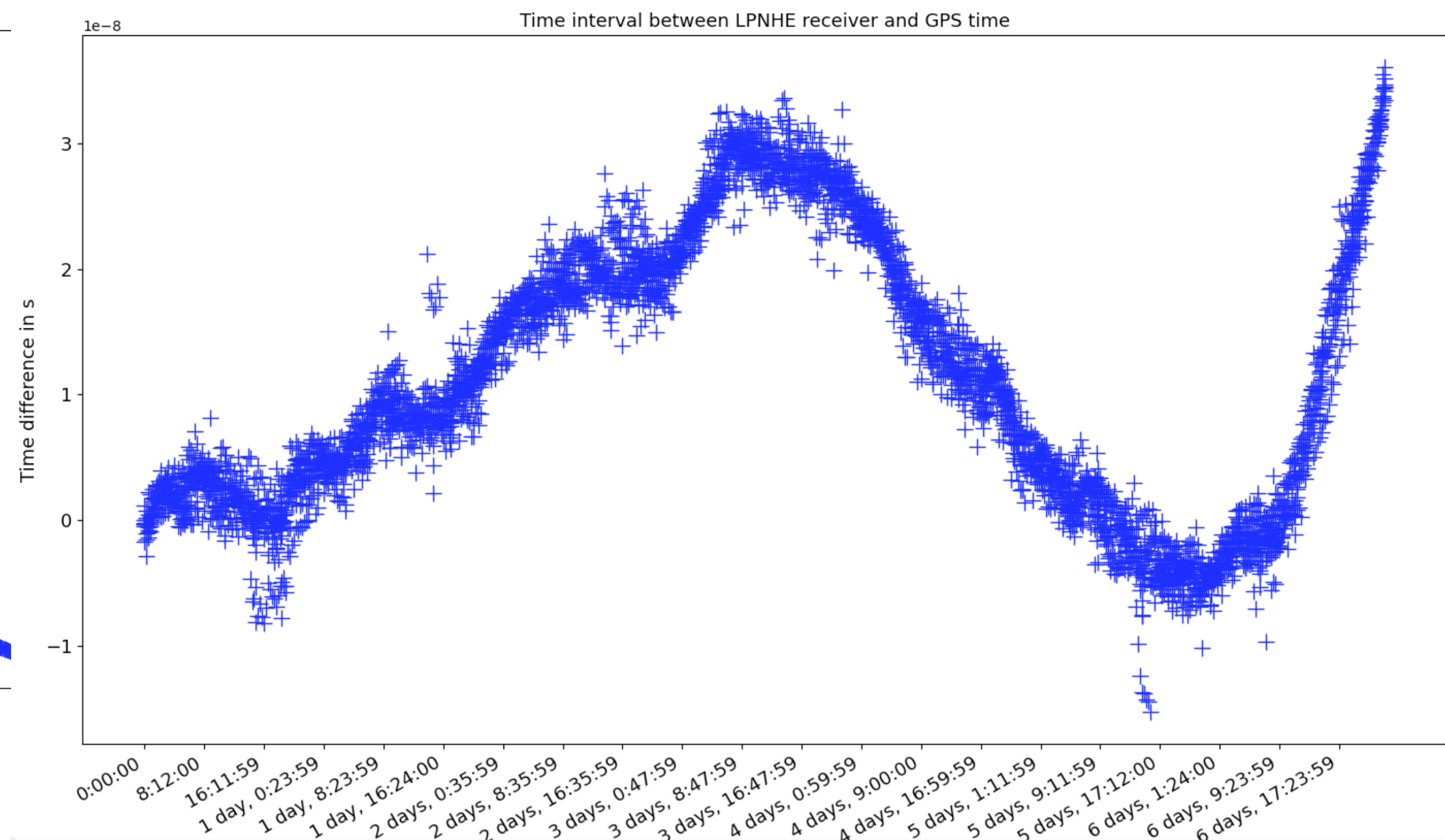
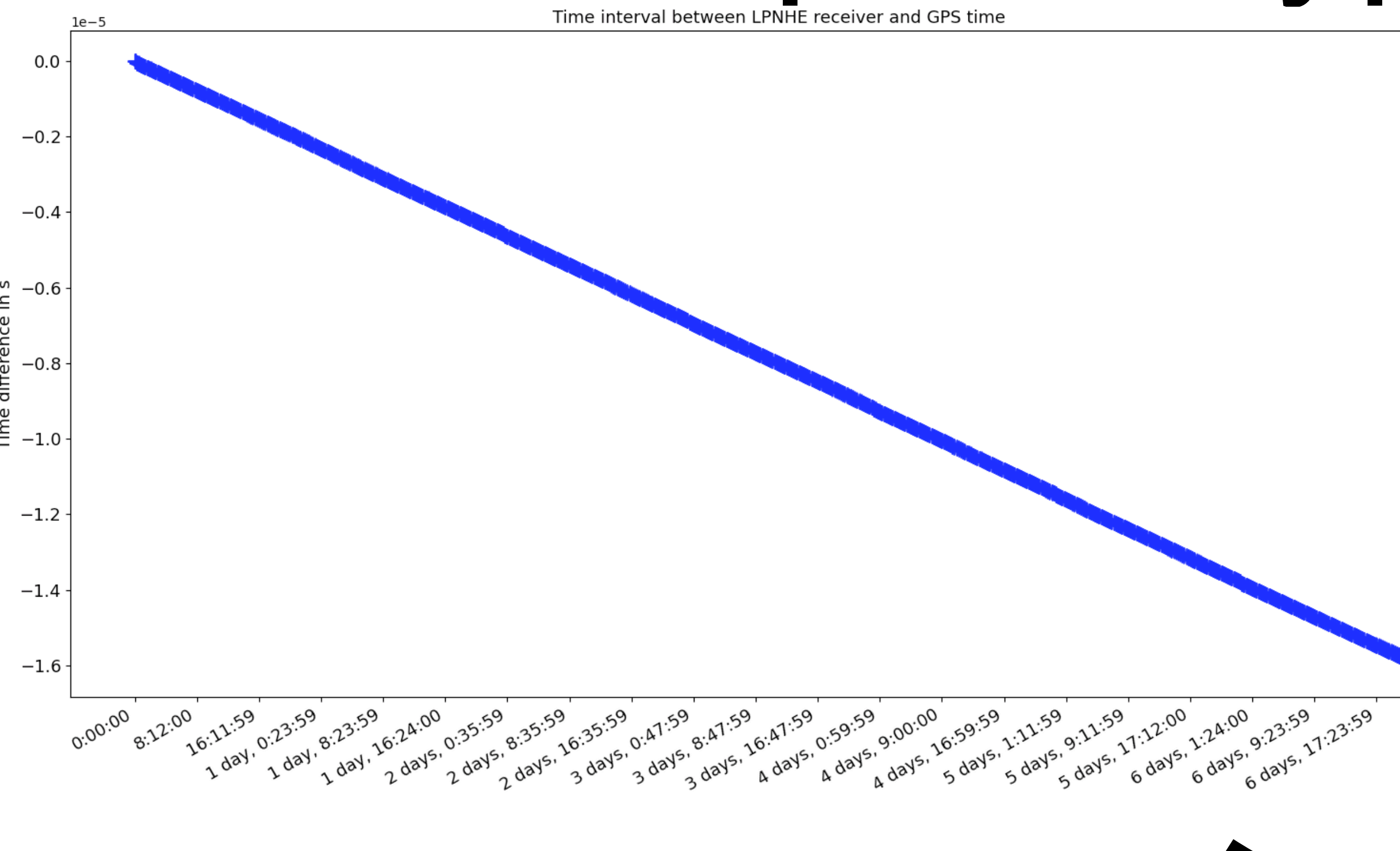


R&D pour Hyper-Kamiokande



**Verifications de notre lien WR et de l'analyse :
même protocole de mesure que au SYRTE =
référence OP71 en input du récepteur**

R&D pour Hyper-Kamiokande

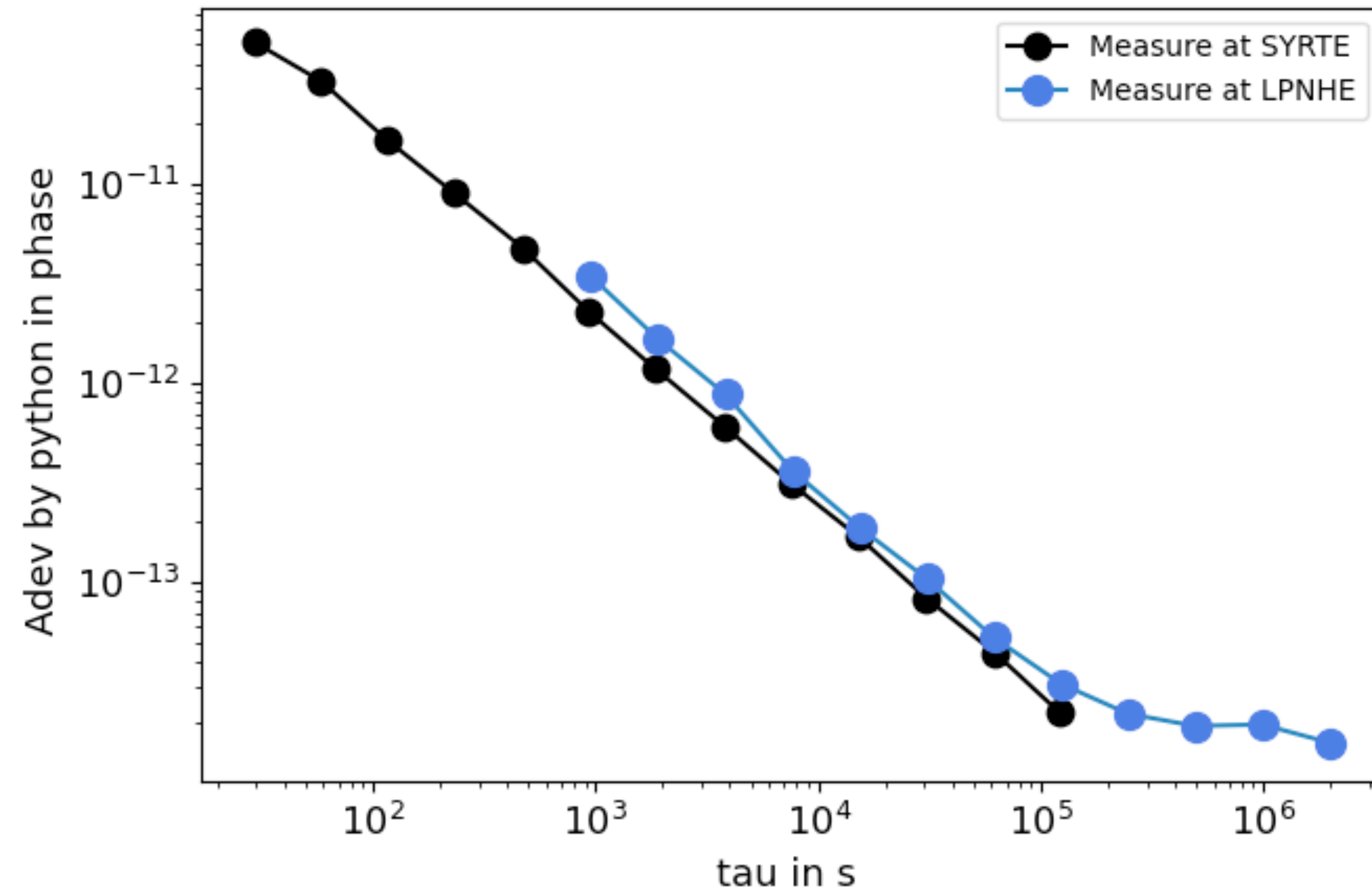


Correction du drift linéaire de l'horloge

Test de la configuration proposée : horloge au Rubidium libre (=
pas de signal d'entrée) + récepteur
6 jours de prise de données au labo

R&D pour Hyper-Kamiokande

Overlapping Adev for LPNHE receiver vs GPS time



Test de la configuration proposée :
horloge au Rubidium + récepteur
6 jours de prise de données au labo

R&D pour Hyper-Kamiokande

CGGTTS produit au LPNHE \rightarrow GPS time - LPNHE Rb time = $\Delta t_{lpnhe-GPS} = \tau_{SA}$

CGGTTS produit au SYRTE \rightarrow GPS time - UTC OP71 = $\Delta t_{GPS} = \tau_{SB}$

Time transfer software $\rightarrow \Delta t_{lpnhe-GPS} - \Delta t_{GPS} = \text{UTC OP71} - \text{LPNHE Rb time} =$

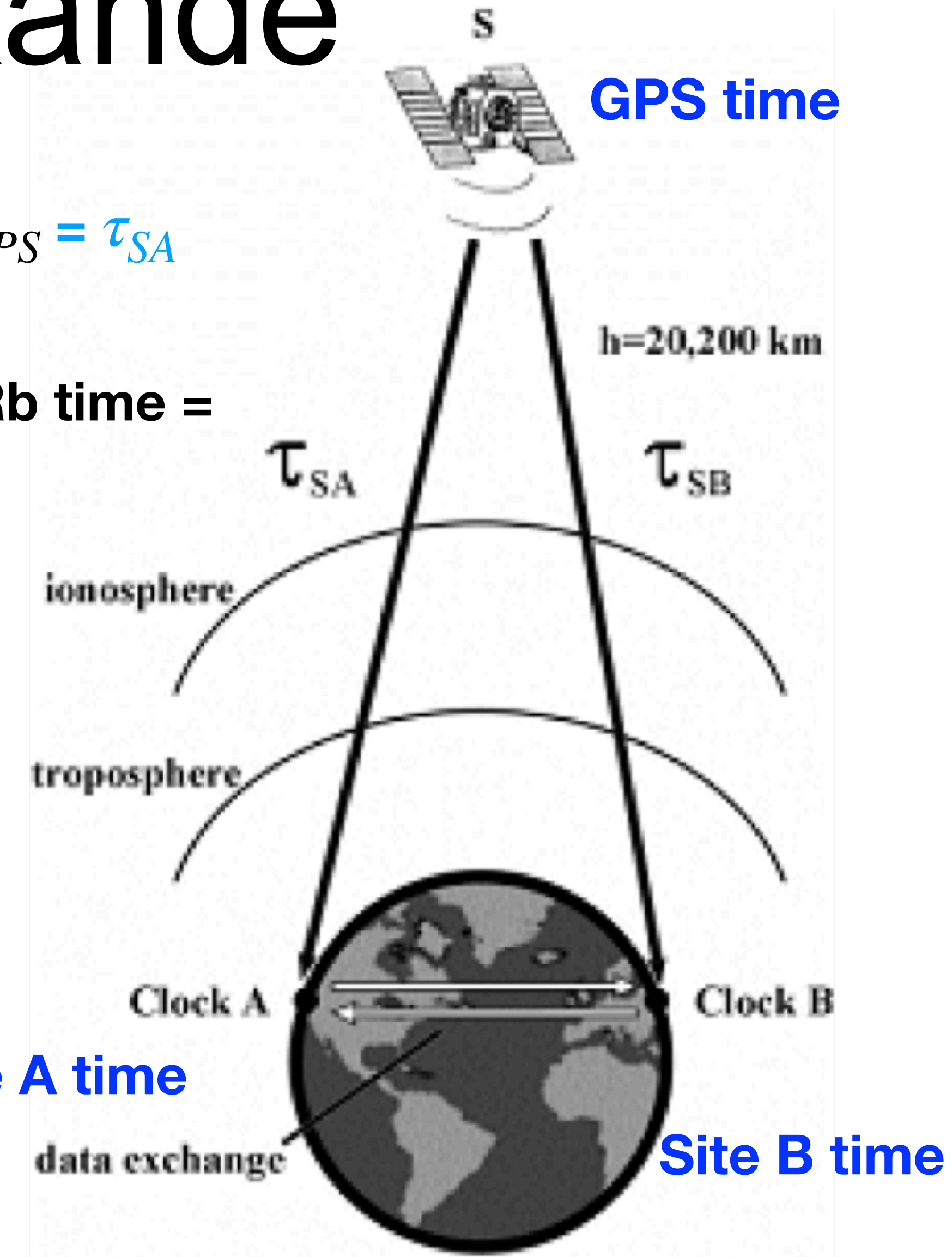
$\Delta t_{lpnhe-ref}$

UTC OP71 = horloge de référence au SYRTE

GNSS = GPS + autres constellations

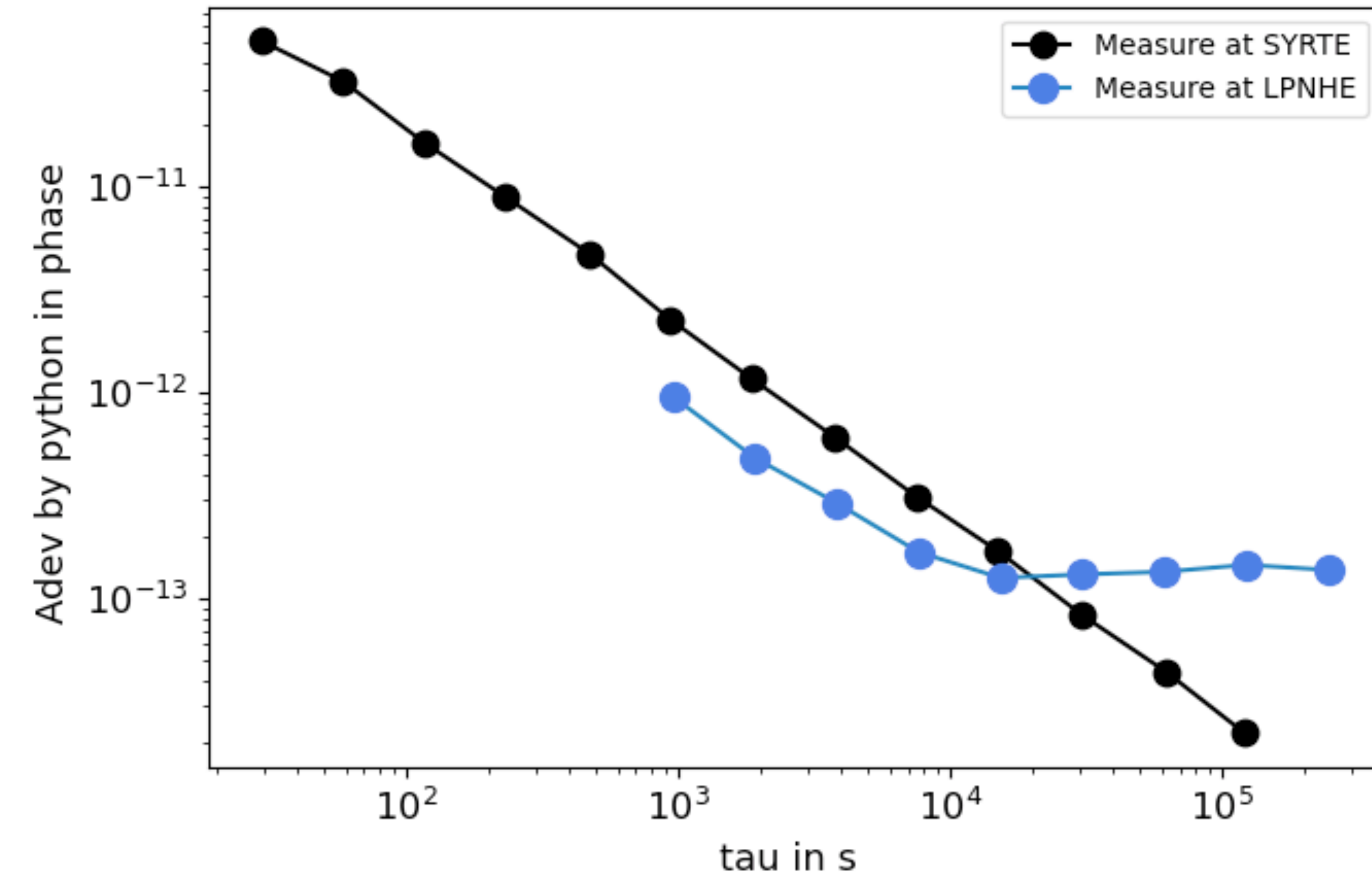
Site A time

Site B time



R&D pour Hyper-Kamiokande

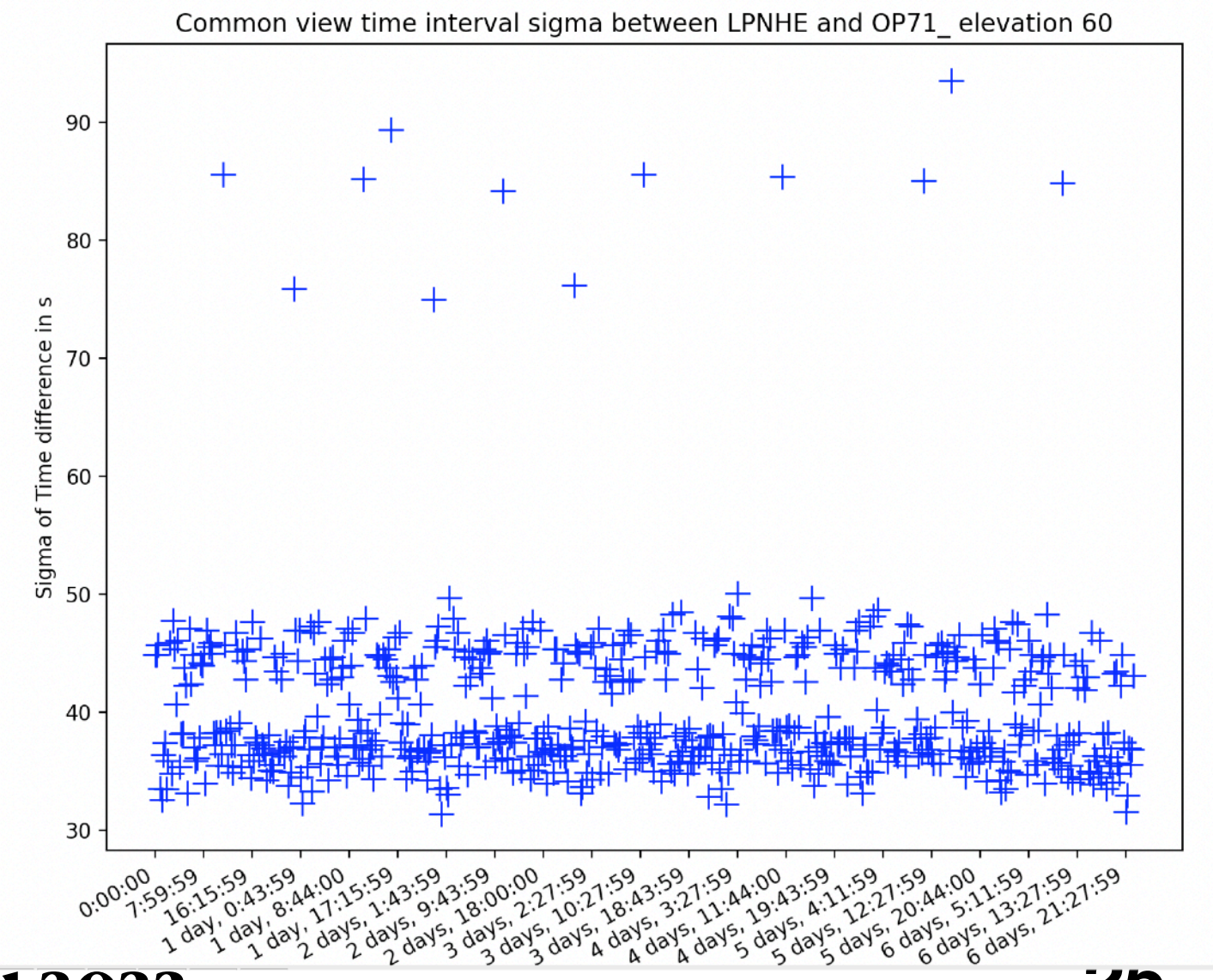
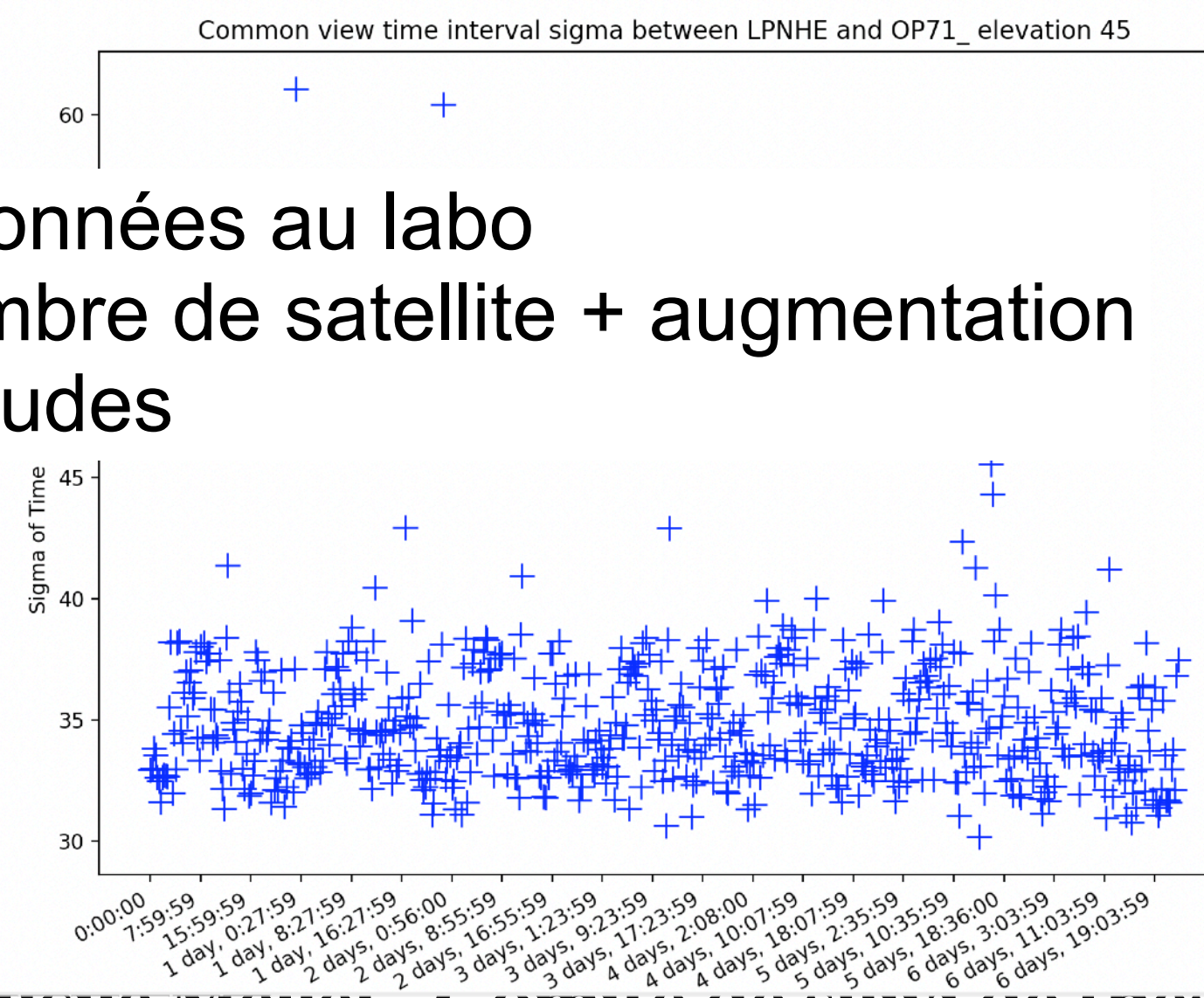
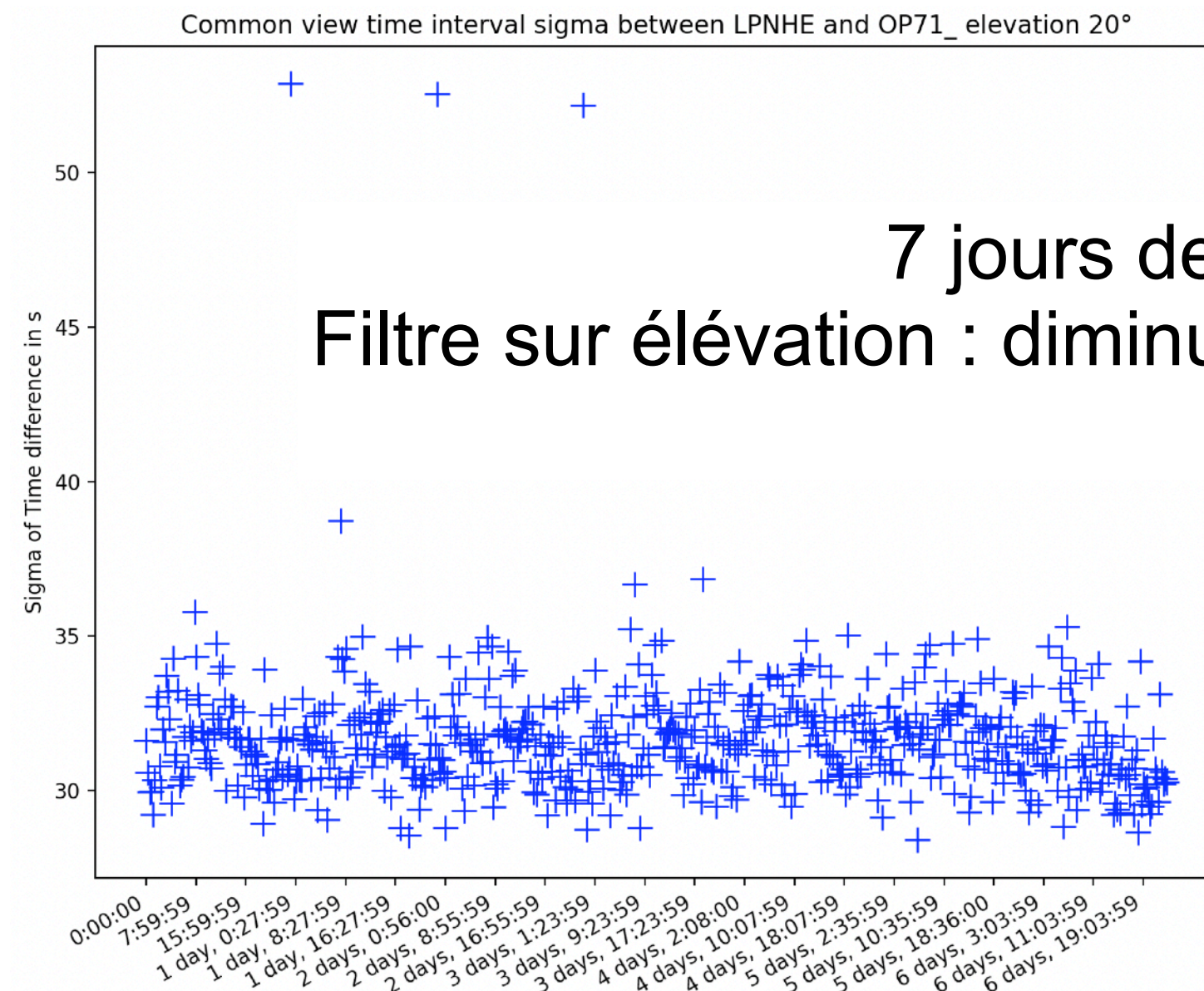
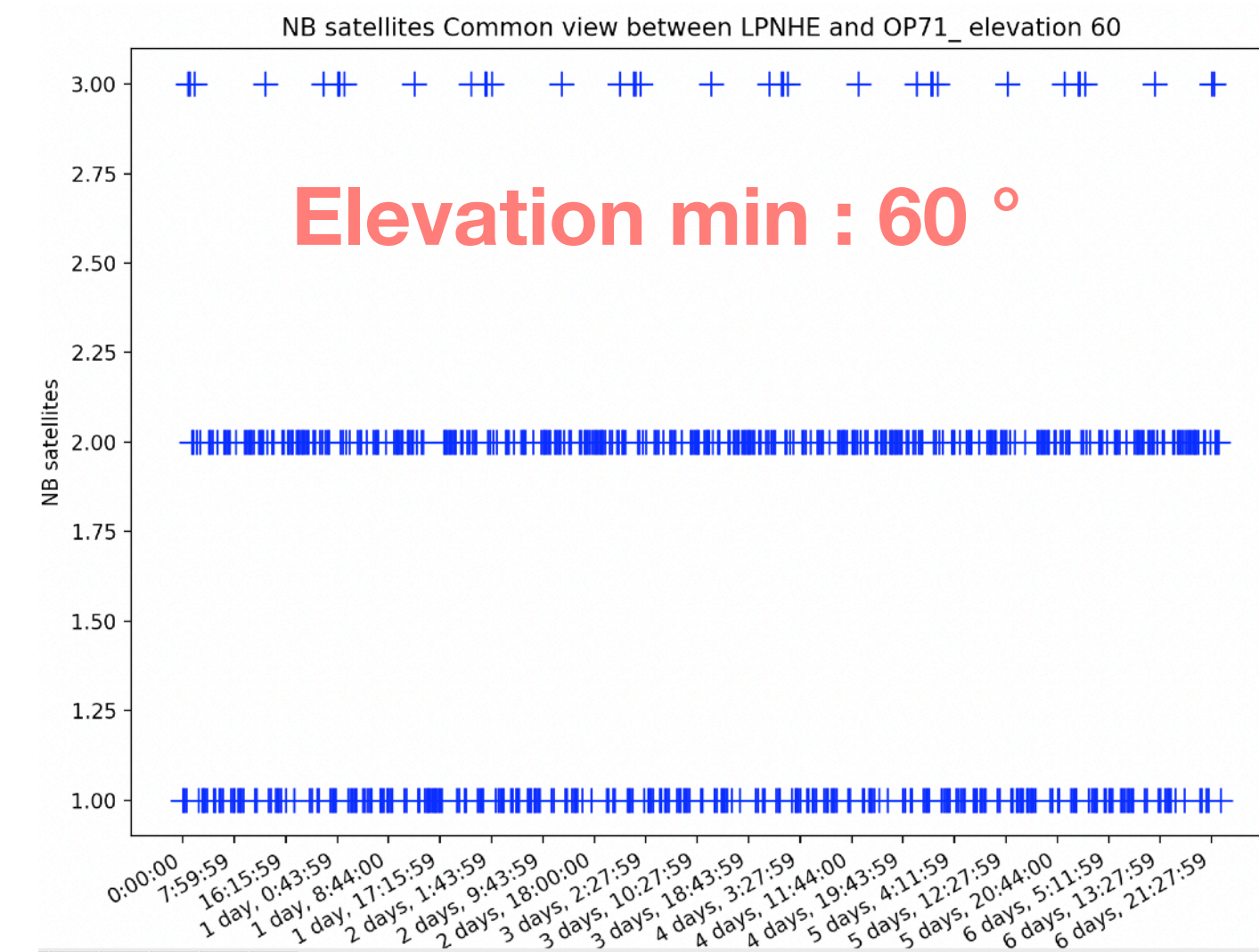
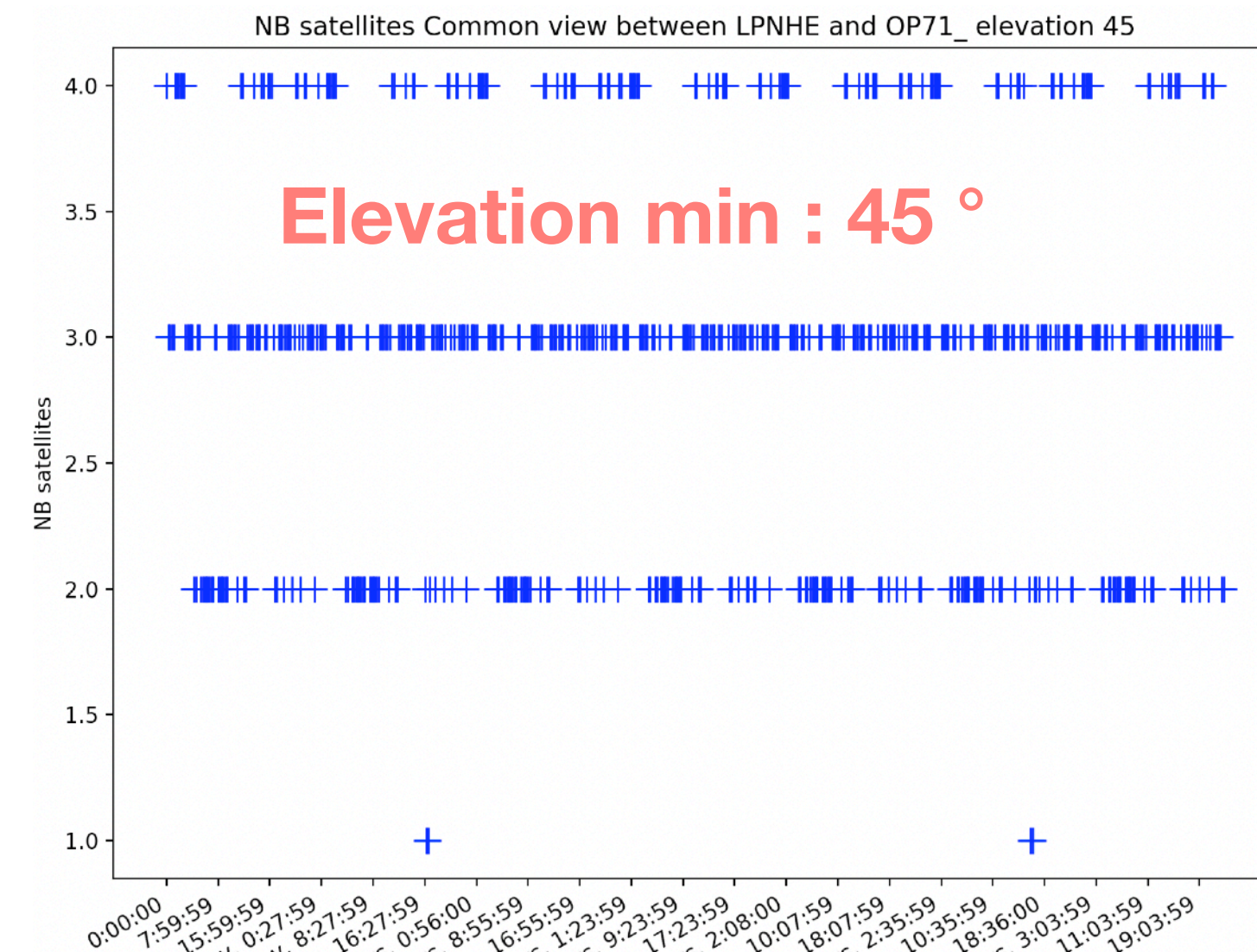
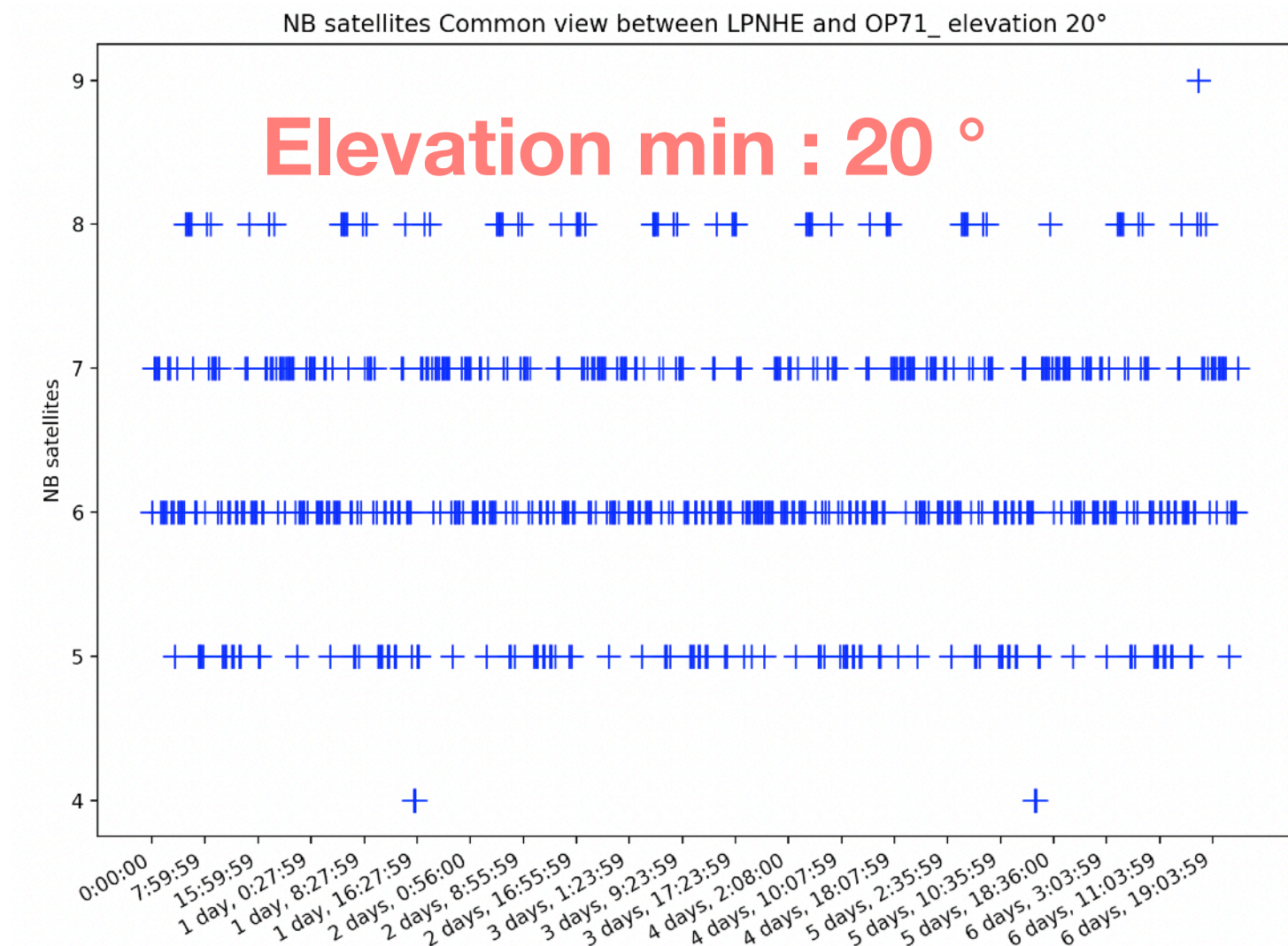
Overlapping Adev for LPNHE vs OP71



Test de la configuration proposée :
horloge au Rubidium + récepteur
6 jours de prise de données au labo

+ transfert de temps avec le SYRTE
pour accord avec UTC de référence

R&D pour Hyper-Kamiokande



R&D pour Hyper-Kamiokande

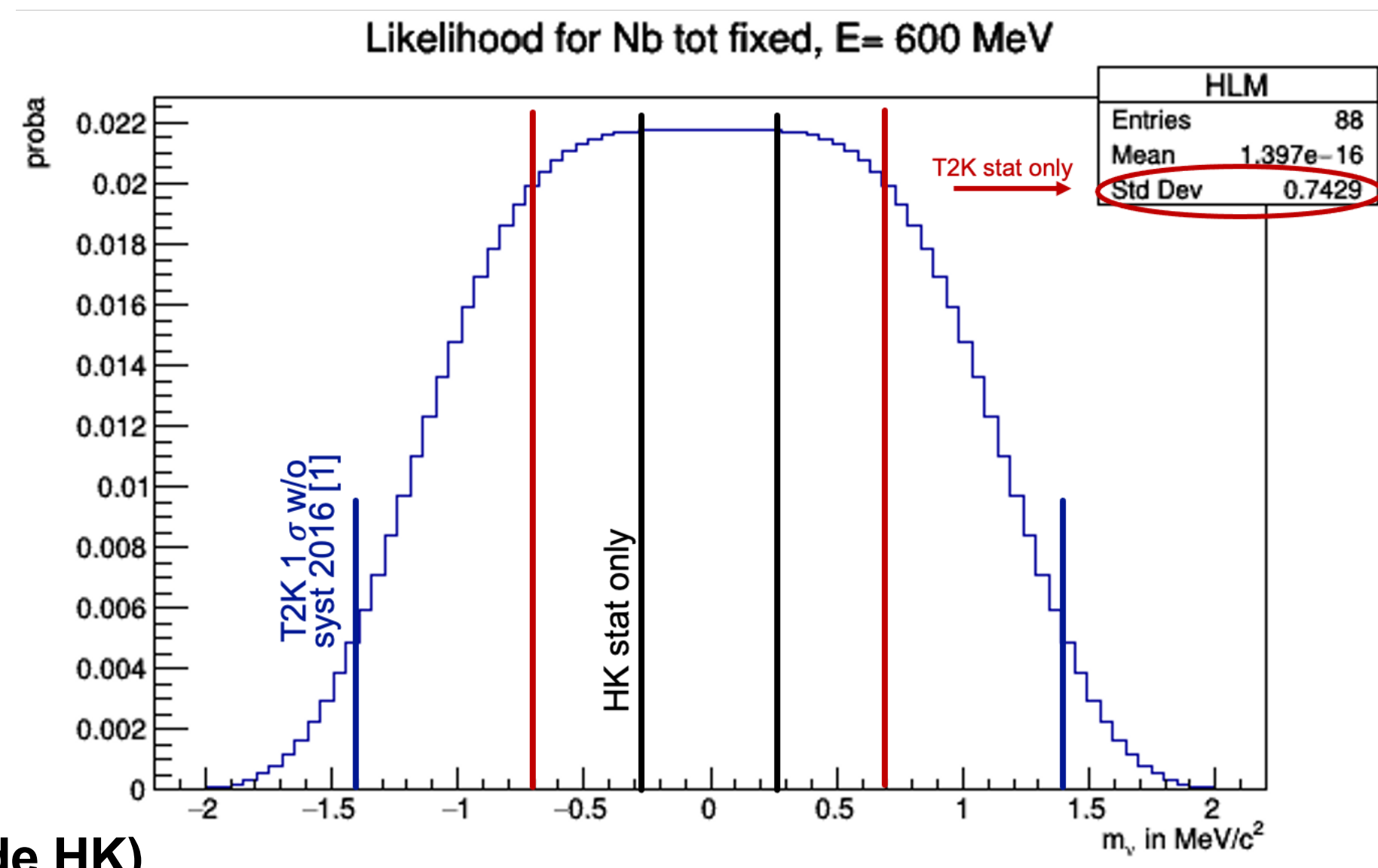
▸ Objectif de ces études dans le cadre de la thèse

- Caractérisation de chaque instrument de la R&D
- Prise en main et adaptation des logiciels de transferts de temps
- Développement de l'analyse de stabilité et des corrections à effectuer, en temps réel et a posteriori
- Etudes de sensibilité en rapport avec la R&D

Etude de temps de vol des neutrinos

- ★ Δt entre détecteurs proche et lointain (SK)
- ★ Δt entre une supernova et SK
- Étude de sensibilité avec statistiques de HK et meilleur accord à UTC

$$T_{m_\nu}(E_\nu) = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \left(\frac{m_\nu c^2}{E_\nu}\right)^2}}$$



« Upper bound on neutrino mass based on T2K neutrino timing measurements. Physical Review D, American Physical Society, 2016, 93, pp.012006. »

2015: 1^{ère} Limite de T2K $m_\nu^2 < 5.2 \text{ MeV}^2/c^4$

$m_\beta \leq 1.1 \text{ eV}$, 90% C.L. (KATRIN experiment)

$\sum m_\nu < 0.2 \text{ eV}$ (cosmologie)

Mais : pas de matériel supplémentaire nécessaire !

E fixe; NB numus fixe (10 ans de HK)

Grille de valeurs pour la masse

Déduction du temps de vol

Précision 27 ns (cf papier de 2015)

Vraisemblance bin à bin entre distribution des temps pour $m = 0$ (centre = t_{light}) et distribution autour du temps déduit

Formations

Formations:

- Journée de sensibilisation à la pédagogie 1 point
- Formation enseignement de l'UFR 1 point
- Cours de statistiques de l'ED 4 points
- Formation à l'éthique de l'ED 1 point
- Enseignement (sur deux ans) 2 points
- Astrophysique des hautes énergies 2 points
- Faire un poster (ED) 1 point
- Formation sur la physique des Neutrinos (ED) 2 points (courant Juin)

14/ 15 points

Autres activités

Enseignement (fin du contrat en Décembre 2022) :

- 28h au Semestre 1 : TPs en L3
- 60h au Semestre 2 : Modélisation numérique pour la physique en Python en L2
 - Prochain semestre : TPs en L3 de nouveau + 12h ?
- Fete de la Science (ma thèse en 5mn + expériences contre-intuitives) Octobre 2021
- JRJC : Octobre 2021 à La Rochelle : présentation + proceeding ?
- Tests Beam : CERN 2 semaines en novembre 2021 + 3 jours en Mai 2022
- Congrès des doctorants Avril 2022 : Poster
- T2K : meeting de collaboration 3 jours en Mai 2022
- Meeting de collaboration : présentation du travail sur les FDS en session plénière, 8-13 Mai 2022
- Neutrino 2022 (conférence internationale) : Poster (en virtuel) 30 Mai au 4 Juin 2022
- Présentation de la R&D sur HK à une conférence cet été (NuFact 2022)

Conclusion et perspectives

Conclusion:

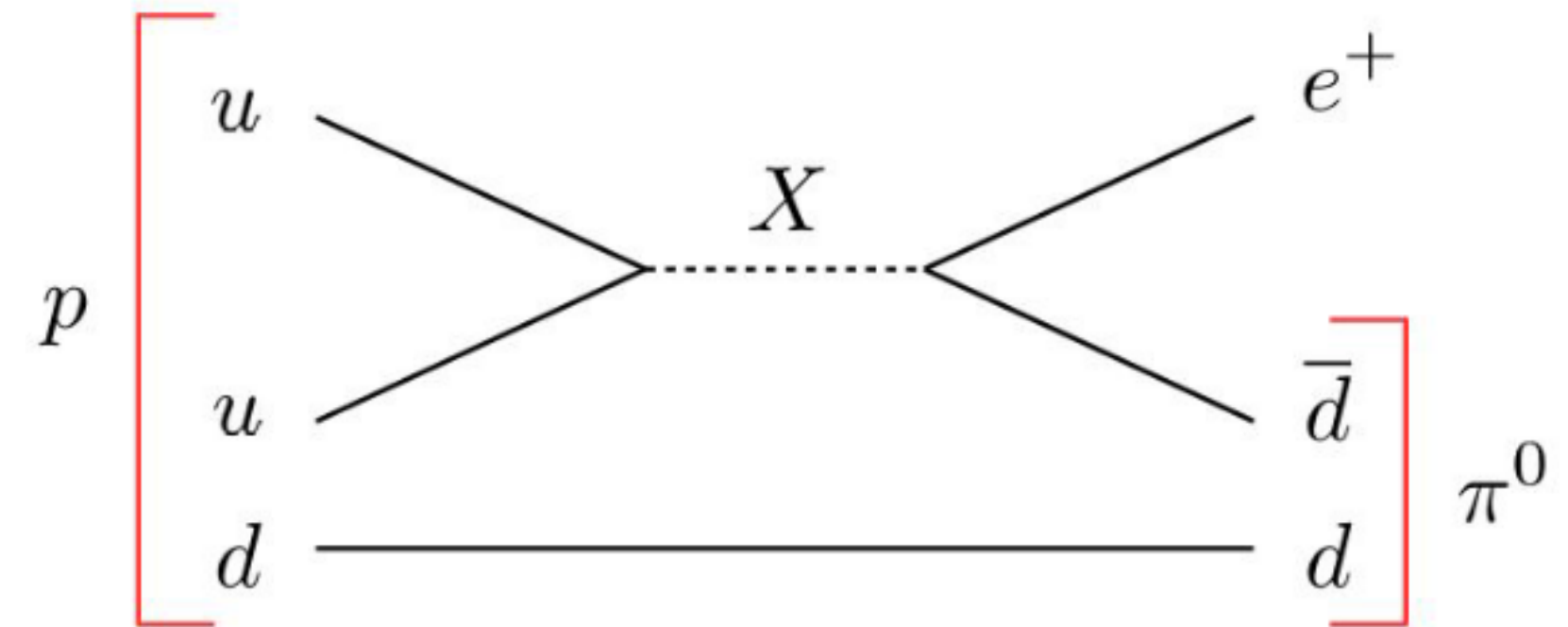
- ▶ Participation à l'analyse : compréhension de toute la « pipeline », travail collectif à distance, dates limites serrées, compétences techniques (submission en parallèles, etc ...)
- ▶ HK : hardware, analyse de données brutes, recherche des informations au fur et à mesure, contact avec un domaine un peu différent

Proche futur :

- ▶ Impact du paramètre alpha de Eb sur l'analyse pour un cas extrême
- ▶ Continuer R&D HK
- ▶ Etude temps de vol si faisable ou autre études de sensibilité en rapport avec le système de synchronisation d'horloge
- ▶ Entamer rédaction de la thèse : Plan + chapitre d'introduction (cet été / au fur et à mesure ?)

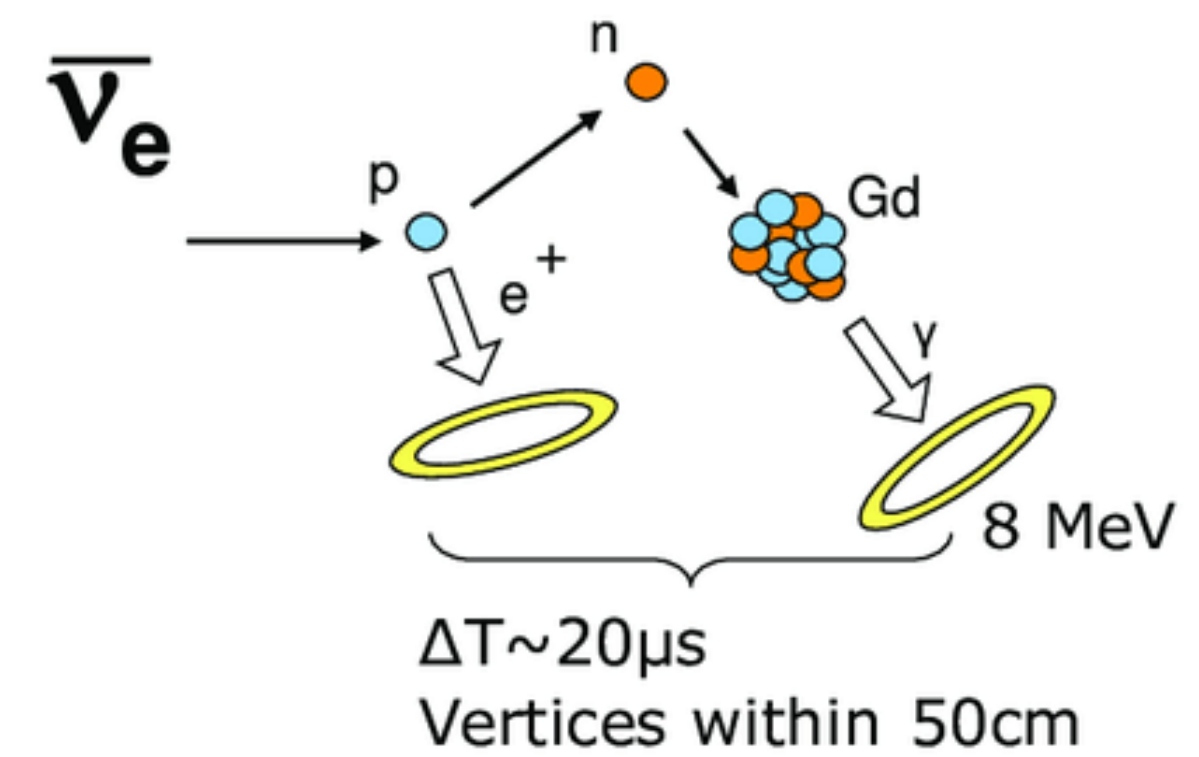
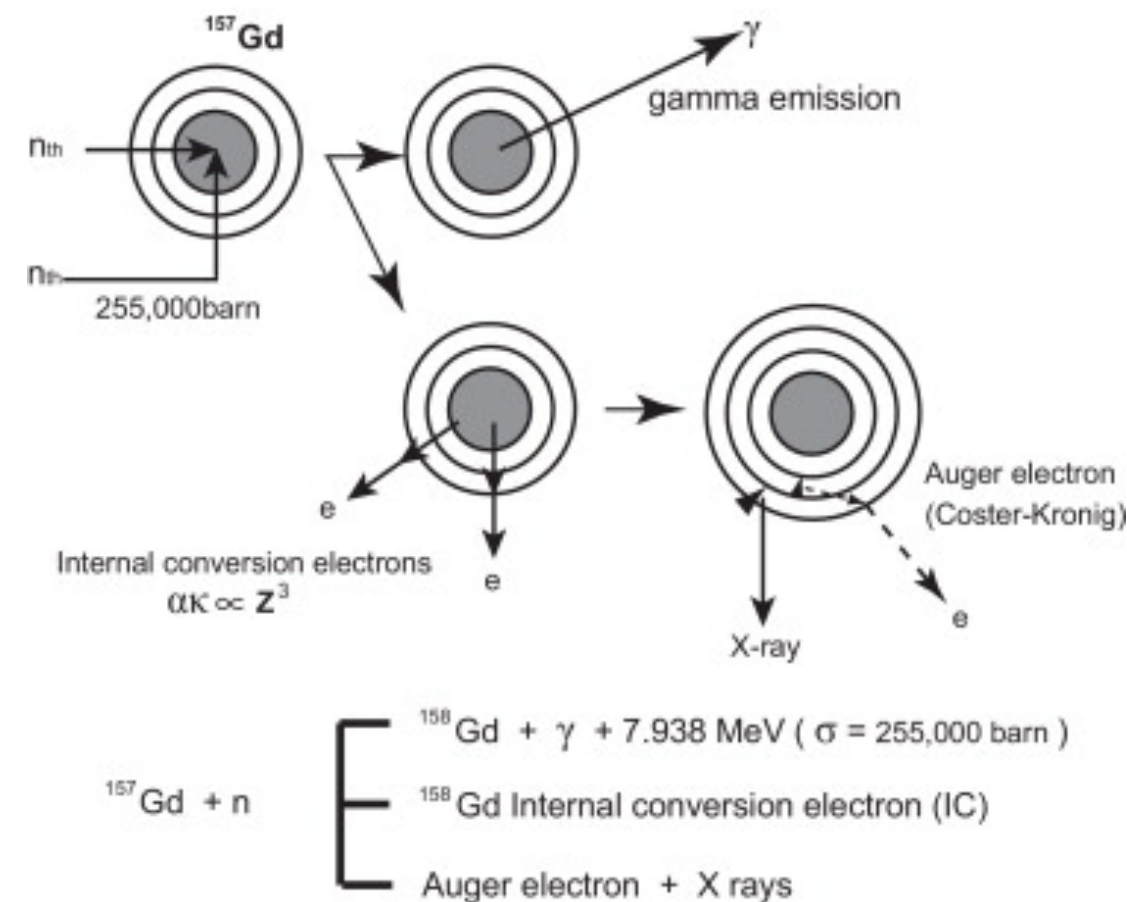
Back-up

Proton decay :



Phys. Lett. B 233 (1-2) 178-182

Gd 157 : neutron capture \rightarrow cascade \rightarrow gammas at 8MeV \rightarrow delayed coincidence detection = anti-neutrino detection (anti-nue + p \rightarrow n + e+)



FDS criteria for $\sin^2\theta_{23}$ and Δm_{32}^2

Criteria and actions to take :

2 quantities :

- B_X^{syst} : Bias using the mean of the 2σ interval wrt σ_{syst}
- $R_X^{2\sigma}$: Ratio of the 2σ interval widths

Apply a gaussian smearing with mean = S^{A22} on the obtained 1σ interval

$$B_X^{\text{syst}} = \frac{\overline{x_{\text{Asimov}}^{2\sigma}} - \overline{x_{\text{FDS}}^{2\sigma}}}{1\sigma_{\text{syst}}^{\text{Asimov}}} \quad \text{with } 1\sigma_{\text{syst}}^2 = 1\sigma_{\text{tot}}^2 - 1\sigma_{\text{stat}}^2$$

$$|R_X^{2\sigma} - 1| > 10\%$$

$$S^{A22} = 1\sigma_{\text{syst}}^{\text{Asimov}} \sqrt{\sum_{\text{FDS} > \text{criteria}} (B_X^{\text{syst.FDS}})^2}$$

Discussed in TN444 : <https://t2k.org/docs/technotes/444/TN444-v2>

The 2σ interval is used to avoid discontinuities in the 1σ intervals on $\sin^2\theta_{23}$

Backup

Backup