

Contributions du LPNHE à l'expérience Hyper-Kamiokande

- Développement d'une base de temps stable à J-PARC (Tokai, Ibaraki) permettant de dater les pulses de neutrinos générés par l'accélérateur,
- Développement d'une base de temps stable auprès du détecteur lointain Hyper-Kamiokande (Kamioka, Hida) synchronisée avec l'UTC et l'accélérateur à J-PARC,
- Distribution de l'horloge auprès des photo-détecteurs du détecteur lointain Hyper-Kamiokande par un système à deux niveaux composé d'environ 60 cartes électroniques.

Système de génération et de distribution du temps pour le détecteur lointain

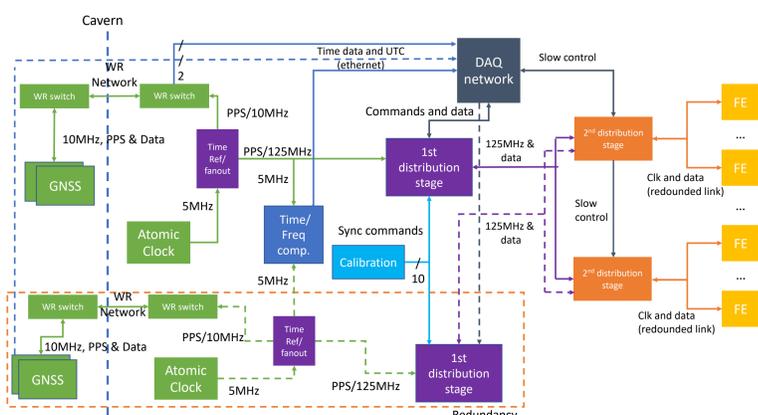


Figure 1 – Système proposé pour le détecteur lointain d'Hyper-Kamiokande. En vert sont représentés les éléments liés au système de génération et de synchronisation du temps avec l'UTC. En violet et en orange, les éléments liés au premier et au deuxième étage de distribution. En jaune, les cartes électroniques connectées sur les photo-détecteurs.

Le système proposé pour la génération et la synchronisation de la base de temps du détecteur (figure 1) est constitué d'un système de génération de la base de temps (horloge à 125 MHz et 1 PPS) grâce à une horloge atomique au rubidium (cf figure 4) synchronisée à l'aide de récepteurs de signaux de navigation satellitaires (GNSS) et d'une cascade à deux niveaux d'environ 60 cartes de distribution de la fréquence vers les 20.000 photo-détecteurs. Les antennes de réception des signaux GNSS se trouvant à l'extérieur de la caverne alors que l'horloge atomique et les cartes de distribution seront installées dans la caverne au plus proche du détecteur, un lien fibré utilisant le protocole White Rabbit [1] permettra l'envoi des fréquences pour comparaison avec le récepteur GNSS ainsi que les informations sur la santé de la réception (nombre de satellites etc.). Une redondance complète du système de génération du temps est prévue.

Au LPNHE une version simplifiée de ce système est en cours d'élaboration et de caractérisation afin de préparer le déploiement auprès du détecteur lointain d'Hyper-Kamiokande.

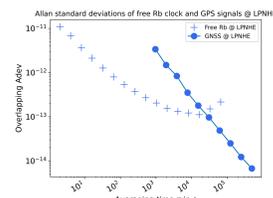


Figure 2 – Déviation standard de Allan de l'horloge Rubidium et du GNSS mesurée au LPNHE

La déviation standard de Allan est l'outil utilisé pour évaluer la stabilité des horloges. Elle peut être évaluée à partir de mesures d'écart de temps entre l'horloge et un signal de référence. L'échantillon de mesures est divisé en sous-échantillons de largeur τ (abscisse) et l'on regarde la moyenne des écarts de variance entre les sous-échantillons deux à deux (ordonnée). L'évolution de la déviation de Allan avec τ caractérise le type de bruits dans le signal (bruit blanc, marche aléatoire etc.). Notre horloge Rubidium est plus précise que le signal GNSS à court terme mais à long terme la précision se dégrade à cause de la marche aléatoire suivie par la fréquence générée.

Transfert de Temps par GNSS en vue commune

La technique de transfert de temps par GNSS en vue commune consiste à utiliser les signaux radiodiffusés en continu pour mesurer l'écart entre une horloge au sol et une horloge embarquée à bord, ce qui donne également accès sous certaines conditions à l'écart entre l'horloge au sol et l'échelle de temps commune du système. Si une autre station effectue les mêmes mesures simultanément ("méthode par vue commune"), un écart entre les deux horloges au sol peut être calculé (figure 3).

Au LPNHE, une antenne reliée au récepteur Septentrio PolRx5TR [2] est installée sur le toit de la tour 13 afin de mener nos expérimentations sur le Transfert de Temps (figure 4). De plus, dans le cadre du projet Equipex T-Refimeve [3], un lien fibré utilisant le protocole White Rabbit relie l'échelle de temps UTC(OP) (la réalisation temps réel pour la France de l'UTC) [4] générée par le laboratoire du SYRTE (Observatoire de Paris) au LPNHE.

Dans le projet T-Refimeve, nous sommes le premier membre utilisateur de la partie synchronisation par WR. La mise en place de ce réseau au sein du LPNHE, outre l'utilisation comme référence en temps, nous a permis également d'acquérir des compétences dans l'utilisation d'un réseau White-Rabbit.

On peut ainsi réaliser le Transfert de Temps entre l'horloge au rubidium (figure 4) du LPNHE et l'échelle de temps UTC(OP) réalisé à partir des horloges du SYRTE et comparer avec la méthode de transfert de temps utilisant le lien White Rabbit.

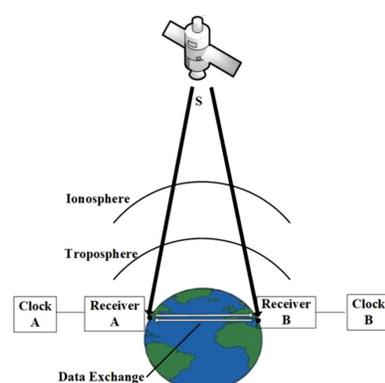


Figure 3 – Principe du Transfert de Temps par GNSS en vue commune. Les mesures réalisées à partir des satellites vus en commun pour les horloges A et B sont échangées afin de déterminer les comportements relatifs des horloges.



Figure 4 – À gauche : l'horloge rubidium. À droite : le récepteur Septentrio PolRx5TR et son antenne sur le toit de la tour 13.

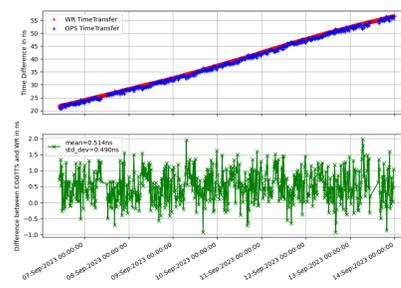


Figure 5 – Comparaison du Transfert de Temps entre WhiteRabbit et GNSS. En haut, tracés des différences d'horloge estimées par WhiteRabbit et GNSS. En bas, différence entre Transfert de Temps entre WhiteRabbit et GNSS.

Afin de comparer les deux techniques de Transfert de Temps, nous mesurons à l'aide d'un TIC (Time Interval Counter) la différence de temps entre le signal PPS (Pulse Per Second) de notre switch WhiteRabbit ("image" du PPS de l'UTC(OP)) et le signal PPS de notre horloge rubidium (courbe rouge dans la figure 5). Ensuite le Transfert de Temps par GNSS, entre le récepteur GNSS du SYRTE connecté à la réalisation de l'UTC(OP) et notre récepteur GNSS connecté à notre horloge rubidium, est réalisé (courbe bleue dans la figure 5).

Ensuite les deux résultats sont comparés par une simple différence (voir la courbe verte dans la figure 5).

Nous avons comparé les résultats de Transfert de Temps par WhiteRabbit et GNSS, les premiers résultats montrent un biais moyen $\delta = 514$ ps avec un écart-type moyen de $\sigma = 490$ ps.

La méthode utilisée pour produire les résultats obtenus de la figure 5 a fait l'objet d'une présentation au sein d'une conférence IEEE [5].

Première campagne de relevés GPS au Japon



Figure 6 – Photo de l'entrée de la caverne du détecteur lointain d'Hyper-Kamiokande et de l'installation temporaire de l'antenne GNSS durant l'été 2023.

Durant l'été 2023, une première campagne de relevés GPS a eu lieu sur le site du détecteur lointain d'Hyper-Kamiokande (figure 6) et auprès de l'accélérateur de J-PARC. En utilisant le récepteur Septentrio, la qualité des signaux GPS a pu être mesurée sur plusieurs sites candidats (figure 7). La région du détecteur lointain étant très montagneuse, certaines zones du ciel sont cachées par les montagnes environnantes, réduisant le nombre de satellites visibles à tout instant.

Cette campagne a permis de confirmer qu'au moins deux satellites sont visibles tout instant, ce qui permet a priori d'appliquer la technique de transfert de temps avec le système de temps de l'accélérateur à J-PARC.

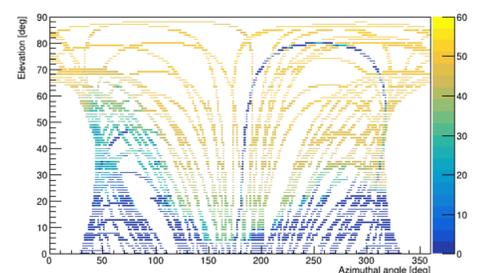


Figure 7 – Relevé de la constellation GPS obtenu en juillet 2023 près de l'entrée de la caverne : rapport signal sur bruit en fonction de l'angle azimutal (abscisses) et de l'élevation (ordonnées) du satellite.

Applications et travaux futurs

Le banc de test utilisant tous les éléments clés du système de génération et de synchronisation du temps est en cours d'élaboration au LPNHE : il permettra de tester toutes les procédures critiques (démarrage du système, transfert de temps...) et déployer le système complet auprès de l'accélérateur de J-PARC et du détecteur lointain en 2025-2026.

Le LPNHE travaille aussi à la réalisation des cartes de distribution de l'horloge pour le détecteur lointain en collaboration avec le CEA Saclay et l'INFN Roma. La production des cartes commencera en 2025 pour être installées sur le détecteur en 2026 avant le remplissage de celui-ci. De plus, une synchronisation précise et de bonne qualité est nécessaire pour faire de l'astrophysique multi-messager et pour détecter la position de supernovae par triangulation entre chaque observatoire.

De plus au sein du LPNHE, une étude est en cours pour estimer les performances d'un système de Transfert de Temps utilisant des GNSS bas-coût (quelques centaines d'euros par récepteur GNSS contre près de 15000 euros pour le récepteur Septentrio PolRx5TR utilisé dans Hyper-Kamiokande). Ce type de système pourrait par exemple être utilisé dans le cadre du projet GRAND [6], chaque antenne devant être synchronisée l'une par rapport à l'autre.

Références

- White-Rabbit Overview - <http://www.ohwr.org/projects/white-rabbit>
- Récepteur GNSS PolRx5TR - <https://www.septentrio.com/en/products/gnss-receivers/reference-receivers/polarx-5tr>
- T-REFIMEVE (Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne) - <https://www.refimeve.fr/index.php/fr/>
- UTC(OP) - <https://syrte.obspm.fr/spip/science/references-micro-ondes-et-echelles-de-temps/activites-138/activites-139/article/1-echelle-de-temps-utc-op?lang=fr>
- Voisin, V & Mellet, L & al, "Advanced time transfer comparison : GNSS versus fiber over a 3 km long baseline" - [IEEE IFTCS-EFTF \(2023\) - https://2023.ieee-iftcs-efth.org](https://2023.ieee-iftcs-efth.org)
- GRAND (Giant Radio Array for Neutrino Detection) - <https://grand.cnrs.fr>