

Préparation à l'analyse combinée T2K-SK

I) Introduction :

J'ai choisi d'effectuer mon stage au Laboratoire de Physique Nucléaire et des Hautes Energies (LPNHE) à Paris. Fondé en 1970, ce laboratoire est impliqué dans plusieurs grands programmes expérimentaux internationaux couvrant les enjeux actuels de la physique des particules, des astroparticules et de la cosmologie. Plus précisément, parmi les 12 groupes de recherche, mon stage est encadré par le groupe Neutrinos travaillant au sein de la collaboration internationale T2K (Tokai to Kamioka), dont l'expérience est basée au Japon et consacrée à la détection et caractérisation des oscillations de saveur de neutrinos. Ce choix de stage de pré-thèse est motivé par mon souhait d'y préparer ma thèse en physique des neutrinos, qui m'intéresse particulièrement à la fois d'un point de vue très concret de par le défi que leur détection représente mais aussi du point de vue des questions scientifiques fondamentales qui restent ouvertes dans ce domaine. Les neutrinos sont à la frontière entre le modèle standard connu et la physique qu'il peut y avoir au-delà. En effet, leur mécanisme d'acquisition de masse et leur nature Dirac ou Majorana sont encore inconnus. De plus, ce champ de recherche possède de nombreuses connections avec d'autres thématiques : l'asymétrie matière/antimatière de l'univers pourrait trouver une origine dans la violation de CP dans le secteur des neutrinos ; les neutrinos de hautes énergies émis par des sources astrophysiques permettent l'étude de celles-ci, etc...

II) Contexte général :

a. Neutrinos

Les neutrinos sont des particules leptoniques élémentaires électriquement neutres et de masse extrêmement faible ($m_\beta \leq 1.1 eV$ [1]) n'interagissant que par interaction faible (à courant chargé ou neutre) ce qui explique leur section efficace et donc leur probabilité d'interaction très faible.

b. Oscillations dans le vide

Par ailleurs, les neutrinos existent en trois saveurs : électroniques, muoniques et tauiques. Mais ces états de saveurs sont des états propres de l'Hamiltonien de l'interaction faible par laquelle les neutrinos sont produits mais ne sont pas les états propres de masse c'est-à-dire de propagation. Ces derniers sont les états 1, 2 et 3. Les états propres de saveurs sont une superposition quantique de ces états de masse dont le mélange est défini par la matrice Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS), *Figure 1*, dont les paramètres sont les angles de mélanges (c_{ij} et s_{ij} signifient $\cos(\theta_{ij})$ et $\sin(\theta_{ij})$), δ_{CP} la phase de violation de CP et P est la matrice contenant les deux phases de Majorana dans le cas de neutrinos de Majorana et la

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

Figure 1: La matrice PMNS

matrice identité sinon. C'est donc parce que les états propres de masse et de saveur sont différents que les neutrinos peuvent changer de saveur pendant la propagation entre leur lieu de production et leur lieu d'interaction (détection),. C'est le phénomène d'oscillation neutrinos.

Pour caractériser ces oscillations, on peut utiliser[2] le formalisme de la mécanique quantique et des ondes planes dans une première approximation, avec un terme de propagation en e^{-iEt} , en unités naturelles et dans la limite relativiste. On obtient une probabilité d'oscillation des neutrinos d'un état de saveur α à β , après une propagation sur une longueur L dans le vide, présentée en Figure 2 où les éléments U sont les éléments de la matrice PMNS, les indices i et j lisent les états de masse (3 dans l'hypothèse standard), E est l'énergie totale et $\Delta m_{ji}^2 = m_j^2 - m_i^2$. Pour les antineutrinos, on obtient un signe – devant la partie imaginaire de la même équation.

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

Figure 2: Probabilité d'oscillation dans le vide (formalisme général)

Pour une transition de ν_μ vers ν_e , pour un rapport L(km)/E(GeV) petit et dans l'approximation $\Delta m_{12}^2 \ll \Delta m_{31}^2 \approx \Delta m_{32}^2$, on obtient [3] :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \cong (\sin \theta_{23})^2 (\sin 2\theta_{13})^2 \left(\sin \frac{1.27 \Delta m_{31}^2 L}{E} \right)^2 \quad (1)$$

c. Effets de matière

Cela décrit les oscillations dans le vide. Cependant, les neutrinos, au cours de leur propagation peuvent interagir de manière non-destructive avec le milieu qu'ils traversent et cela peut avoir un impact parfois non négligeable sur la probabilité d'oscillation. En effet, cela ajoute, à l'Hamiltonien de propagation, un terme de potentiel dépendant de la saveur leptonique, et des densités du milieu en électron n_e et en neutron. Pour les antineutrinos, le potentiel est le même mais de signe opposé. Pour les milieux de densité constante, on peut en déduire des conditions de résonance où l'angle de mélange du à ces effets de matière est maximal et donc potentiellement observable soit pour les neutrinos ou bien pour les antineutrinos (ce qui induit une asymétrie à distinguer de celle induite par une éventuelle violation de CP). Si la densité n'est pas constante, une dépendance en temps au cours de la propagation est nécessaire pour modéliser ces effets. On obtient par exemple une probabilité d'oscillation

(Eq1) dépendante d'un paramètre $\Gamma = \frac{\sqrt{2} G_F n_e E}{\Delta m_{31}^2}$ pour une transition de ν_μ vers ν_e avec G_F la constante de Fermi par les modifications suivantes (issues de [3]) des paramètres : $\Delta m_{31,M}^2 = \Delta m_{31}^2 \sqrt{(\sin 2\theta_{13})^2 + (\Gamma - \cos 2\theta_{13})^2}$ et $(\sin 2\theta_{13,M})^2 = \frac{(\sin 2\theta_{13})^2}{(\sin 2\theta_{13})^2 + (\Gamma - \cos 2\theta_{13})^2}$ (2)

Ces effets sont à prendre en compte lorsque la distance parcourue dans la matière est

importante, typiquement pour un neutrino ayant traversé plusieurs centaines de kilomètres dans la Terre ou bien le Soleil.

d. Les « secteurs » de neutrinos

En effet, les (anti) neutrinos peuvent être produits en quantité par diverses sources : désintégration beta (réacteurs nucléaires), processus de fusion dans le Soleil, source astrophysique de ultra-hautes énergies et par interaction des protons des rayons cosmiques avec l'atmosphère créant des pions et des kaons qui se désintègrent par interaction faible en paires lepton/neutrinos. D'un point de vue de vocabulaire expérimental (sur Terre), puisque les probabilités d'oscillations et donc les paramètres d'oscillation accessibles pour une mesure dépendent du rapport énergie/distance, on classe les paramètres en secteurs de cette manière: secteur 1-2 (secteur solaire), secteur 2-3 (secteur atmosphérique) et secteur 1-3 (secteur des réacteurs).

e. Les questions ouvertes en physique des neutrinos

De nombreuses questions restent ouvertes sur la physique des neutrinos, bien que l'on soit désormais plus dans une période de précision que de découvertes, et justifient la recherche dans ce domaine. En voici un court aperçu :

La hiérarchie de masse n'est pas connue. Par convention $m_2 > m_1$ est posé et $\Delta m_{sol}^2 \ll \Delta m_{atmos}^2$ mais cette hiérarchie peut être dite « normale » ($1 < 2 < 3$) ou inversée ($3 < 1 < 2$). Les Δm^2 étant des paramètres d'oscillation, cette hiérarchie peut être contrainte par l'étude d'oscillations dans certaines conditions.

Les paramètres d'oscillations ne sont pas totalement contraints : on peut voir en Figure 3 (issue de [4]), l'étendue des régions de confiance à 90% obtenue par la collaboration T2K dans le plan Δm_{32}^2 vs $(\sin \theta_{23})^2$ dans l'hypothèse de hiérarchie normale.

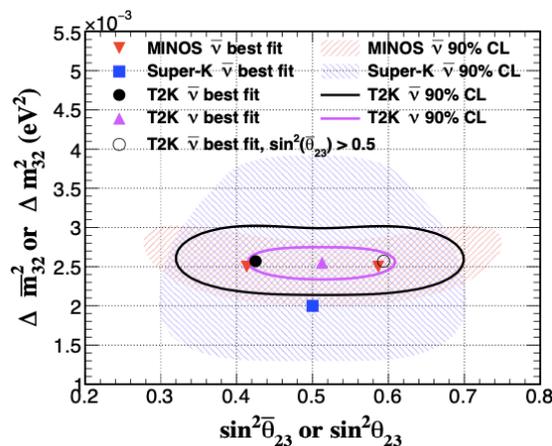


Figure 3: Contraintes T2K sur les paramètres atmosphériques d'oscillations

La phase de violation de CP n'est pas connue non plus, d'ailleurs il n'y a pas de preuve expérimentale formelle (à 5σ) d'une violation de cette symétrie dans le secteur des leptons. Comme dit précédemment, il est compliqué dans le contexte de la physique des neutrinos de

la distinguer de l'asymétrie matière-antimatière résultant des interactions le long de la propagation.

Enfin, le mécanisme d'attribution d'une masse très faible aux neutrinos n'est pas connu non plus et relève de physique au-delà du modèle standard. La recherche de ce mécanisme pose la question de la nature du neutrino : Dirac comme les autres particules du modèle standard ou bien Majorana ce qui signifie que le neutrino serait sa propre antiparticule.

f. T2K et SK

Pour tenter de s'approcher des réponses à ces questions, de nombreuses expériences de physique des neutrinos existent, ont existées ou vont exister. Présentons ici les deux expériences pertinentes pour le contexte de ce stage. Ces expériences sont des expériences d'oscillations qui peuvent donc être sensibles aux paramètres d'oscillations, à la violation de CP et la hiérarchie de masse mais elles ne peuvent répondre à la question de la nature des neutrinos, puisque les phases de Majorana s'annulent dans la formule de probabilité d'oscillation.

Tout d'abord, SuperKamiokande (SK) est un détecteur de neutrinos situé dans la mine de Mozuki au Japon afin de réduire le bruit de détection induit par les muons cosmiques principalement. Il s'agit d'une cuve cylindrique contenant 50k tonnes d'eau et dont les parois sont couvertes de plus de 12000 tubes photomultiplicateurs (PMT), le volume étant divisé en une partie extérieure servant de veto d'événements non souhaités pour l'analyse par un jeu de coïncidences, et d'une partie intérieure (majoritaire) qui est le volume de détection. Le principe de détection est par lumière Cherenkov. Les neutrinos interagissent par interaction faible à courant chargé principalement de façon quasi-élastique (CCQE) avec les nucléons. Cela produit un lepton chargé de la même saveur que le neutrino ayant interagi et ce lepton, relativistique et donc dépassant la vitesse de la lumière dans l'eau, émet un cône de lumière (ici bleu à un angle de 42° degré). Cette lumière est détectée par les PMT. On peut noter ici que la forme de ces anneaux Cherenkov détectés permet de distinguer les électrons des muons. En effet, un électron entraîne une avalanche électronique et le signal est donc un anneau avec des bords diffus issu de la superpositions de plusieurs anneaux tandis qu'un muon donne un anneau bien défini. En revanche, SK ne permet pas distinguer de manière directe les interactions dues à des neutrinos de celles dues à des antineutrinos car la détection Cherenkov ne donne pas l'information du signe de la charge électrique de la particule détectée.

Actuellement, l'expérience SuperKamiokande vise principalement à étudier les neutrinos solaires et atmosphériques et leurs oscillations ainsi qu'à détecter une éventuelle explosion de supernova.

Mais la cuve de SK sert aussi de détecteur ou final à l'expérience Tokai to Kamioka (T2K) qui est une expérience de physique des neutrinos sur accélérateur. C'est une expérience d'oscillations, ce qui signifie que la mesure qui est faite est celle du taux d'une saveur par rapport à une autre en début et en fin de parcours du faisceau ce qui signe une apparition ou disparition d'une saveur. En pratique, un faisceau de neutrino est produit sur la côte Est du Japon au JPARC par collision de protons sur une cible de carbone permettant la production de pions et de kaons qui se désintègrent ensuite en (anti)neutrinos muoniques. Un détecteur initial (proche) appelé ND280 et composé de multiples sous-détecteurs permet de connaître

la composition initiale du faisceau en ν_μ et ν_e et de réduire les diverses incertitudes systématiques comme les sections efficaces de processus nucléaires par exemple. ND280 est un détecteur magnétisé ce qui permet d'obtenir le signe des particules chargées et donc de différencier les neutrinos des antineutrinos contrairement à SK. D'ailleurs, le faisceau peut fonctionner en mode neutrino ou antineutrino. Le faisceau parcourt ensuite une distance de 295km jusqu'au détecteur final (SK). L'énergie est centrée sur 600MeV pour optimiser les mesures d'oscillation(voir Figure 2) par rapport à cette distance et le faisceau est non-aligné de 2.5° afin de sélectionner une plage d'énergie (et d'impulsion) plus réduite et ainsi de maximiser la probabilité d'oscillation de ν_μ en ν_e . Cette mesure d'oscillation permettant bien sur l'accès à la mesure des paramètres d'oscillation.

III) Contexte du stage :

a. Une analyse combinée

Comme annoncé par son titre, le but de ce stage est de préparer une analyse combinée des données des expériences T2K et SK. Comme dit précédemment, nous sommes dans une ère de précision dans le domaine de la physique des neutrinos. De ce fait découlent naturellement les motivations d'une analyse combinée. Cela permet d'abord d'augmenter les statistiques en ajoutant des données supplémentaires. Cela permet aussi, puisque ici le stage s'inscrit dans la collaboration T2K, d'ajouter à cette expérience sur faisceau des données plus diverses en énergies et en distances parcourues ce qui rend plus généraux les résultats que l'on peut obtenir. Mais surtout, de par cette diversité des énergies et des distances parcourues, les deux expériences sont en fait complémentaires pour leur sensibilité à des paramètres différents (découlant de la formule d'oscillation et des effets de matière). En effet, T2K a une meilleure sensibilité à δ_{CP} notamment car le détecteur proche, magnétisé, permet de différencier les neutrinos des antineutrinos et donc de mieux caractériser leurs proportions dans le flux, tandis que SK, avec des rapports L/E différents est plus sensible à la hiérarchie de masse. Or, ces paramètres sont liés, d'où l'intérêt de pouvoir combiner dans une même analyse les données des deux expériences, avec une méthode identique, de sorte de pouvoir prendre en compte ce lien et d'améliorer la sensibilité aux deux paramètres, l'un contraignant l'autre et vice versa.

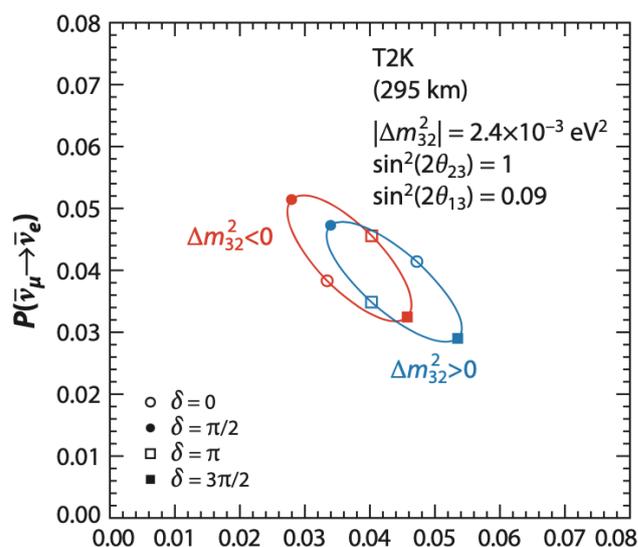


Figure 4: Probabilités d'oscillation antineutrinos vs neutrinos

On peut en voir l'illustration en Figure 4 issue de [4], qui présente les probabilités d'oscillation de saveur muonique vers une saveur électronique pour les antineutrinos versus pour les neutrinos, avec un rapport E/L représentatif de l'expérience T2K. On peut voir que les deux hiérarchies (normale en bleue, inversée en rouge) ne peuvent être totalement séparées par ces conditions expérimentales. Cependant, la corrélation entre δ_{CP} et Δm_{atmos}^2 y est évidente, δ_{CP} variant le long des ellipses sur toutes les valeurs possibles.

Bien sûr, une telle analyse avec un traitement parfaitement égal des données dans les méthodes employées et dans la prise en compte des calculs représente un travail immense et un véritable challenge. Notamment parce que pour l'instant les deux collaborations utilisent des codes d'analyses distincts chacun optimisé pour leur sensibilité spécifique mais surtout parce que le traitement des nombreuses erreurs systématiques de manière cohérente et en acceptant des corrélations entre paramètres est très compliqué à faire. Pour illustration, voici une liste non exhaustive des sources d'incertitudes possibles : les flux de neutrinos (faisceau et atmosphériques), les sections efficaces des très divers processus, notamment à haute énergie (courant neutre avec production de π^0 , diffusion profondément inélastique(DIS), ...), erreur d'identification des produits d'interactions primaires et secondaires, transparence de l'eau (affectant la détection Cherenkov), ratios neutrinos/antineutrinos et électron/muon, ratio kaon/pion dans les gerbes atmosphériques, activité solaire, profil de densité atmosphérique (impacte la distance parcourue), le volume fiduciel, calibrations, etc... La complexité d'une telle analyse réside aussi dans le fait que les neutrinos des expériences T2K et SK ont des paramètres d'énergie et de cinématique différents.

b. Le stage

Mon stage s'inscrit dans ce contexte comme une préparation à une combinaison des données réelles de T2K et SK et me permettra de me familiariser avec ces types d'analyses et de codes. Le programme est donc ici de préparer l'incorporation des neutrinos atmosphériques de SK dans les analyses standards de T2K, en simplifiant bien sûr pour une toute première approche. La première étape de simplification sera d'estimer une longueur et une densité moyenne traversées par ces neutrinos atmosphériques puis d'en déduire une probabilité d'oscillation sans prendre en compte les angles azimutaux. Bien sûr, la prise en compte des angles d'arrivée des neutrinos dans la cuve Cherenkov serait cruciale dans une véritable analyse, d'autant plus que les angles possibles sont très restreints pour le faisceau contrairement aux neutrinos atmosphériques. L'idée est de générer des spectres simulés de neutrinos atmosphériques et d'étudier les oscillations sur ceux-ci et ensuite d'essayer, avec ces données simulées, d'arriver à une première étude de sensibilité aux paramètres recherchés. Cela permettra donc une familiarisation avec les codes (C++) nécessaires, les simulations de données, leur technique d'analyse et de calcul de sensibilité.

c. Les analyses déjà effectuées dans la littérature

Il s'agit donc de préparer une analyse qui combine de manière optimale les données de SK et T2K. C'est à cause de toutes les difficultés évoquées précédemment à conduire une telle analyse que les premiers pas vers une combinaison ont été fait avec des faiblesses comme on en discutera concernant les deux analyses présentées ci-après. En effet, pour l'instant aucune analyse combinée complète n'a été faite. Cependant, celles partielles décrites ici représentent une avancée vers plus de précision.

1_ Introduction aux méthodes d'analyse

Une méthode d'analyse largement utilisée pour récupérer les paramètres d'oscillations à partir des probabilités observées expérimentalement d'oscillations est l'utilisation de fonctions de vraisemblance. Une fonction de vraisemblance est une fonctions de plusieurs paramètres : ici, les paramètres d'oscillations, et éventuellement de violation de CP, etc.. c'est-à-dire des paramètres physiques recherchés par l'analyse et les paramètres de nuisances qui contiennent les différentes variables participant aux incertitudes comme le flux, les sections efficaces,... La fonction de vraisemblance décrit l'adéquation entre un modèle et une réalité observée et est un produit des probabilités (pour chaque observation) selon le modèle testé d'avoir obtenu la probabilité ou distribution de probabilité observée . Typiquement, dans le cadre d'une analyse d'oscillation, la fonction de vraisemblance se factorise (simplification) de la manière suivante :

$$\mathcal{L}_{tot} = \mathcal{L}^{osc} \times \mathcal{L}^{syst} \times \mathcal{L}^{data}$$

\mathcal{L}^{syst} comporte les contraintes sur les paramètres de nuisance liés au flux (contraint par le détecteur proche) et les effets systématiques sur la détection à SK. \mathcal{L}^{data} encode la vraisemblance des données expérimentales d'oscillation par rapport au modèle à 3 saveurs en fonction des paramètres d'oscillation. \mathcal{L}^{osc} permet d'ajouter à la fonction totale des contraintes extérieures venant de d'autres expériences (NOvA, Double-Chooz, RENO, Daya Bay, MINOS...).

Les paramètres pour lesquels la fonction de vraisemblance est maximale sont ceux pour lesquels les modèles testés correspondent le mieux aux données. Pour un modèle donné, la maximisation de \mathcal{L}_{tot} donne donc les paramètres recherchés avec un certain niveau de confiance qui peut être calculé à posteriori par des tests statistiques tels que celui du χ^2 réalisé entre le modèle avec les paramètres issus de la fonction de vraisemblance et la distribution des données.

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des paramètres concernant la gestion de ceux de nuisance. Ici, celle qui nous intéresse est celle utilisée par le groupe d'analyse dans lequel s'inscrit le travail de ce stage : le groupe P-thêta (1 des 3 groupes d'analyse de T2K, les deux autres étant Valor et Mach3). Il s'agit de la marginalisation des paramètres de nuisance, c'est-à-dire l'intégration de ceux-ci sur l'ensemble de leurs valeurs possibles. De plus, l'analyse peut être faites en plusieurs étapes, pour optimiser les temps de calculs notamment, par exemple dans [4] par paires de paramètres.

La différence entre les deux analyses discutées ci-dessous réside principalement dans le contenu de leur fonction de vraisemblance.

2_Intégration des contraintes T2K aux analyses SK

Tout d'abord, une analyse a été publiée en 2018 par la collaboration SK [3].

Comme dit précédemment, SK est une expérience d'oscillation de neutrinos atmosphériques (et solaires). L'analyse présentée dans la publication de 2018 [3], utilise donc des échantillons de données de neutrinos atmosphériques uniquement, provenant des 4 cycles de prise de données de l'expérience (de 1996 à 2018) même si la majeure partie des statistiques provient du 4^{ème} et dernier cycle. L'analyse de ces neutrinos atmosphériques est optimisée pour être sensible à la hiérarchie de masse et la partie combinée de l'analyse (d'intérêt ici) a pour principe le suivant : ajouter les résultats finaux et publiés de T2K notamment sur les paramètres d'oscillation sous forme de contraintes supplémentaires dans la méthode d'obtention des paramètres pour l'analyse atmosphérique. Cette méthode apporte une

contrainte supplémentaire et donc un meilleur niveau de confiance sur les résultats obtenus, cependant, elle est loin d'être idéale comme nous le verrons.

Les évènements parmi les données, retenus pour l'analyse sont scrupuleusement sélectionnés en plusieurs phases. Sans entrer dans les détails, les neutrinos atmosphériques d'une énergie supérieure au GeV sont sélectionnés, de saveurs électronique et muonique. Une succession de sélections est soigneusement effectuée pour distinguer les neutrinos des antineutrinos ce qui est essentiel à la sensibilité à la hiérarchie de masse, comme dit en expliqué en II)c. Ces sélections sont différentes selon les types d'interaction (CCQE, diffusion profondément inélastique, diffusion avec résonance ...), par exemple, la sélection peut se faire statistiquement sur les distributions, ou en utilisant le nombre de pions produits (évènements multi-anneaux), etc...

La méthode d'analyse (sans combinaison) des données est ici [3] la suivante : une fois les échantillons sélectionnés, une simulation de données est réalisée, en utilisant les logiciels de simulation du détecteur et du flux de neutrinos atmosphériques, pour toutes possibles combinaisons de valeurs des paramètres d'oscillations et ensuite les données et les simulations sont divisées en bins de la même manière de sorte de pouvoir faire un fit entre les deux. En effet, un fit est optimisé entre les données réelles et les différents sets de paramètres simulés par une optimisation de l'outil statistique χ^2 avec l'hypothèse de distributions de Poisson. Le set de paramètres pour lequel le χ^2 est minimisé est le meilleur accord avec les données et donc ce sont les paramètres recherchés. Cela correspond à maximiser la fonction de vraisemblance. La sensibilité des résultats obtenus est évaluée à partir des différentes sources d'incertitudes systématiques prises en compte aux différentes étapes de l'analyse. Les paramètres du secteur solaire sont considérés connus.

Pour améliorer la sensibilité aux paramètres recherchés, notamment à la hiérarchie de masse qui dépend des paramètres d'oscillation, les auteurs ont contraint d'avantage la recherche de ces paramètres dans l'analyse par les données déjà obtenues par d'autres expériences. Cela est donc implémenté dans le facteur \mathcal{L}^{osc} de la fonction de vraisemblance.

Tout d'abord, l'angle θ_{13} dans l'analyse est contraint (au lieu d'être un paramètre libre) autour de sa valeur ($\sin^2 \theta_{13} = 0.0219 \pm 0.0012$) connue grâce aux expériences de Daya Bay (Chine), RENO (Corée du Sud) et Double Chooz (France)[3]. L'incertitude sur cet angle est traitée dans l'analyse comme une erreur systématique supplémentaire. On remarque que cette manière de combiner les résultats n'est pas optimale du tout, puisque seul le résultat final est pris en compte sans traitement égal des statistiques, conditions et incertitudes des différentes expériences .

Ensuite, une implémentation des résultats de T2K un petit peu plus rigoureuse (ce qui s'impose car les incertitudes sur les paramètres d'oscillations dans le secteur atmosphérique sont plus importantes que celles du secteur réacteur (1-3)) est possible car les deux expériences ont le même détecteur final et donc ont en commun leur logiciel de simulation du détecteur et des interactions de neutrinos et leurs outils de reconstructions d'évènements. Les auteurs ont donc pu simuler des données de T2K avec uniquement des informations sur le flux du faisceau et sur les erreurs systématiques (notamment venant des mesures du détecteur proche de T2K). Ces données doivent bien sûr, pour être valables, redonner dans certaines limites les résultats publiés par T2K lorsque le processus d'analyse décrit

précédemment leur est appliqué sans les données de SK. Le même volume fiduciel que pour les données de SK est utilisé dans la simulation et seuls des événements « totalement contenus » dans le détecteur (c'est-à-dire sans particule détectable s'échappant du détecteur après interaction (le volume veto donne cette information)), provenant d'une interaction CCQE (quasi-élastique et à courant chargé pour rappel) et d'énergie reconstruite du neutrino inférieure à 1.3GeV (pour éliminer les électrons provenant de la désintégration d'un muon (cosmique par exemple)) sont retenus. Ces échantillons simulés sont ensuite intégrés à l'analyse aux côtés des données réelles de SK avec leur poids statistique respectifs. On ne combine pas ici les données des deux expériences, on rajoute simplement les contraintes issues des résultats des analyses de T2K dans la fonction de vraisemblance pour laquelle les seules données sont celles de SK. Leurs erreurs systématiques sont aussi implémenté de la manière suivante : les erreurs sur le détecteur et les sections efficaces sont considérées totalement corrélées tandis que les erreurs sur les flux sont décorréliées puisque découlant de mesures et de processus différents.

Par cette méthode d'analyse, le résultat obtenu dans cette étude dont le but principal était de contraindre la hiérarchie de masse, est une faible préférence pour une hiérarchie « normale » avec $\chi^2_{normal} - \chi^2_{inversée} = \Delta\chi^2 = -3.48$ ce qui entraîne, si l'on se met dans le cas d'une hiérarchie normale, parmi les sets de paramètres d'oscillations autorisés dans un intervalle de confiance de 90%, un rejet entre 81.9% et 96.7% de la hiérarchie inversée. Ces chiffres de rejet marquent la possibilité de distinguer les deux hypothèses de hiérarchie, sachant qu'une découverte certaine serait d'être capable de séparer totalement les deux hypothèses avec une sensibilité de 5 sigmas. Grâce à l'analyse combinée, les auteurs ont pu contraindre un tout petit peu plus ces résultats en obtenant une préférence légèrement plus forte pour la hiérarchie normale avec $\Delta\chi^2 = -4.33$ et un rejet entre 91.9% et 94.5%.

Cela démontre, dans le principe, l'avantage de combiner des données, cependant le faible gain en sensibilité s'explique par la manière non exhaustive de prendre en compte les données de T2K, notamment le traitement des incertitudes n'est pas optimal, les données de T2K ne sont prises en compte qu'en tant que contraintes sur la vraisemblance , limitées à certains cas (en terme d'énergie et d'interactions) et seule l'analyse adaptée aux neutrinos atmosphériques est appliquée directement. Cela est donc réducteur en sensibilité car très indirect par rapport à une combinaison des données réelles des deux expériences au même titre.

3_ Première analyse combinée T2K-SK avec des neutrinos sub-GeV

Une analyse allant vers une combinaison plus poussée a été conduite Xiaoyue Li et ses collègues lors de sa thèse [5] :

Comme mentionné précédemment, les deux expériences T2K et SK procèdent à des analyses différentes de leurs données notamment dans le traitement des incertitudes systématiques et dans leur méthode statistique. C'est pourquoi une analyse simultanée des données des deux expériences, en les traitant de la même manière est compliquée. De plus, les énergies des neutrinos détectés sont différentes, centrées sur 600MeV pour T2K et atteignant plusieurs GeV pour SK. Cette analyse est la première à effectuer ce type d'étude en essayant de traiter les incertitudes de manière cohérente. Et pour ce faire, elle ne traite que des échantillons de données résultant d'interactions CCQE sans production de pions, ce qui permet de

sélectionner des énergies communes ($<1.33\text{GeV}$) et d'avoir un meilleur contrôle des incertitudes puisque les sections efficaces de ces processus sont mieux connues. Cela permet en théorie une meilleure sensibilité à la phase de violation de CP mais prive cette analyse d'un accès à la hiérarchie de masse.

La méthode d'analyse utilisée est la suivante : il s'agit d'une méthode statistique de Bayers. L'idée générale est de calculer étape par étape, la distributions des valeurs possibles des paramètres recherchés (oscillation, δ_{CP} , Δm_{ij}^2) sachant la distribution précédente et en prenant en compte les erreurs systématiques sous forme de paramètres de nuisance. Il faut ensuite intégrer sur toute la distribution statistique de ces incertitudes. Pour que cela soit faisable, notamment du point de vue du temps de calcul, un algorithme de Monte Carlo (tirage randomisé avec un certain poids statistique) par chaîne de Markov (les probabilités dans l'étape traitée ne dépendent que de celles de l'étape précédente, sans mémoire donc) est utilisé. A chaque étape, la fonction de vraisemblance est calculée et maximisée permettant de contraindre petit à petit les paramètres. Cette fonction est ici factorisée en 4 termes afin de séparer SK, T2K, les incertitudes systématiques et les contraintes précédentes sur les paramètres d'oscillation. Les termes de SK et T2K étant ici des données réelles. Cette factorisation simplifie les calculs mais introduit une des faiblesses importantes de l'analyse. Elle considère les différents paramètres totalement décorrélés ce qui n'est pas le cas. Par ailleurs cette analyse considère aussi les paramètres d'angles zénithaux d'entrée des neutrinos dans le détecteur, le nombre d'anneaux Cherenkov et les paramètres d'identification des particules chargées détectées indépendants les uns des autres, ce qui rajoute des approximations importantes dans l'analyse et donc dans la contrainte des paramètres d'oscillation et de violation de CP.

Ensuite, similairement à l'analyse présentée précédemment, une simulation est implémentée et à chaque étape de la chaîne de Markov, récupère les nouveaux paramètres d'oscillation calculés. Cela permet de, à la fin, faire un fit entre cette simulation et les données afin d'obtenir les résultats finaux de l'analyse et la sensibilité obtenue.

Cette analyse [6] a conduit à des résultats dont les valeurs sont légèrement décalées par rapport à ceux de l'analyse officielle des données de T2K uniquement, pour les paramètres d'oscillation bien que les échantillons utilisés ne soient pas exactement les mêmes. Cependant, le gain attendu en sensibilité à la phase de violation de CP n'a pas été obtenu par cette méthode d'analyse, principalement car sans combinaison, SK et T2K montrent une préférence pour des valeurs différentes de δ_{CP} et donc les chaînes de Markov, sans mémoire, ne permettent pas de distinguer entre les deux mais seulement d'obtenir une distribution plus large, contenant les deux préférences.

On peut donc dire que cette analyse souffre, comme la précédente, des approximations nombreuses et des étapes intermédiaires ainsi que de la sélection des neutrinos atmosphériques de basse énergie (non-majoritaires à SK) menant à une combinaison non directe et sans traitement réellement égal des données et incertitudes des deux expériences. Cependant, cette analyse est la première analyse combinée de données bien qu'elle soit partielle, elle marque donc le début de ce type d'études et en démontre les difficultés et intérêts.

IV) Conclusion :

Ce travail bibliographique présente donc , après une introduction à la physique des neutrinos, les enjeux de la recherche actuelle dans ce domaine et notamment, concernant les expériences d'oscillations des neutrinos telles que celles discutées ici à savoir T2K et SuperKamiokande, la mesure de précision des paramètres d'oscillations (angles de mélange et différences de masse, notamment dans le secteur atmosphérique), la découverte et la mesure de la violation de CP dans le secteur des neutrinos, et la détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos. Nous avons pu voir que nombre de ces paramètres sont corrélés et qu'ils sont accessibles de manière idéale en terme de sensibilité pour des rapports de distance sur énergie différents, c'est-à-dire dans des expériences différentes. Cela, ajouté au fait que l'augmentation des statistiques améliore la précision de la mesure, motive la mise en place d'analyses combinées de plusieurs expériences complémentaires. C'est dans le but de préparer une telle analyse que ce stage vise à préparer l'incorporation de données de SK aux analyses de T2K. Mais une telle combinaison, comme il a été vu à travers les analyses combinées partielles déjà tentées et discutées ici, pose de grandes difficultés, notamment parce que les échantillons de données des deux expériences ne sont comparables, dans la plupart du temps, ni dans leurs caractéristiques énergétiques, d'interaction, ou cinématiques ni dans les incertitudes systématiques qui les accompagnent. Ce travail bibliographique a permis d'avoir un aperçu des méthodes d'analyse et de combinaison qu'il faudra utiliser dans ce type d'analyse. Notons que pour le stage, il s'agit de modéliser de la manière la plus simple possible les probabilités d'oscillation des neutrinos atmosphériques et leur détection dans le détecteur SK avec les outils d'analyse de T2K. Ensuite, de plus en plus de paramètres pourront être implémentés tels que des paramètres géométriques, systématiques, de reconstruction, etc.. afin de conduire une première étude de sensibilité pour une combinaison avec des données simulées de manière simple de sorte de commencer à aborder une future analyse plus complète. Cela dans le cadre d'une analyse officielle de la collaboration et avec donc comme objectif à long terme (au-delà du stage), la contribution à cette première analyse combinée complète T2K-SK.

Bibliographie:

- [1] M. Aker *et al.*, "An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, no. 22, p. 221802, Nov. 2019, doi: 10.1103/PhysRevLett.123.221802.
- [2] C. Giganti, S. Lavignac, and M. Zito, "Neutrino oscillations: the rise of the PMNS paradigm," *Prog. Part. Nucl. Phys.*, vol. 98, pp. 1–54, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.pnpnp.2017.10.001.
- [3] K. Abe *et al.*, "Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV," *Phys. Rev. D*, vol. 97, no. 7, p. 072001, Apr. 2018, doi: 10.1103/PhysRevD.97.072001.
- [4] K. Abe *et al.*, "Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target," *Phys. Rev. D*, vol. 96, no. 1, p. 011102, Jul. 2017, doi: 10.1103/PhysRevD.96.011102.
- [5] R. B. Patterson, "Prospects for Measurement of the Neutrino Mass Hierarchy," *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, vol. 65, no. 1, pp. 177–192, Oct. 2015, doi: 10.1146/annurev-nucl-102014-021916.
- [6] Xiaoyue Li, "A Joint Analysis of T2K Beam Neutrino and Super-Kamiokande Sub-GeV Atmospheric Neutrino Data," Stony Brook University, 2018.