

Etudes à l'aide du Module Proton

Chapitre 15

Nouvelle méthode de reconstruction des événements

15.1 Introduction

Cette dernière partie présente les premiers résultats obtenus à l'aide du Module Proton après son installation pour la deuxième période de prise de données de l'expérience T2K (novembre 2010). L'objectif de cette étude est, comme dans la deuxième partie de cette thèse, de mesurer le nombre d'événements quasi élastiques à courant chargé (notés CCQEL par la suite). Les analyses présentées en partie 2 visaient à démontrer la possibilité de réaliser cette mesure à l'aide du Module Proton, à l'aide d'études préliminaires. Ces études comportaient certaines faiblesses, comme expliqué ci-dessous, que nous allons chercher à corriger.

Les faiblesses principales tenaient à la simulation Monte Carlo utilisée pour évaluer les performances de la reconstruction, et de la sélection des différents types d'interactions, et à la stratégie utilisée pour reconstruire les événements. Le problème de la simulation Monte Carlo est résolu en utilisant désormais une nouvelle simulation développée par le groupe de l'Université de Kyoto, utilisée pour la partie précédente, à laquelle a été ajouté le Module Proton.

Lors de l'étude de la séparation des types d'interactions dans la partie 2, nous nous sommes restreints pour les bruits de fonds aux interactions notées 12 et 13. En effet, ce sont les bruits de fond principaux pour les CCQEL car ces interactions produisent comme le signal deux et seulement deux particules chargées, susceptibles de laisser une trace dans le détecteur. Cela suppose néanmoins qu'il est possible d'éliminer les autres interactions produisant un nombre supérieur de particules chargées. Or comme nous nous limitons précédemment à la reconstruction de deux traces, cela réduisait notre capacité à caractériser les événements produisant plus de particules chargées, comme par exemple les interactions "multi-pi", produisant plusieurs pions chargés. Nous allons donc changer de stratégie pour la reconstruction des événements.

15.2 Reconstruction des événements

Nous allons présenter la nouvelle façon de reconstruire les événements dans le Module Proton. L'algorithme central permettant de reconstruire des traces demeure inchangé, reposant toujours sur la transformation de Hough présentée dans la partie 2. Néanmoins la structure générale de la reconstruction change. Elle est maintenant composée de plusieurs étapes, comportant chacune des tests pour déterminer si l'on passe à l'étape suivante.

La première étape est une sélection des événements, où nous cherchons à savoir si l'événement correspond bien à une véritable interaction, et non pas à un ensemble de hits de bruit ayant déclenché l'acquisition des données. Nous reconstruisons ensuite des traces indépendamment sur chaque projection à l'aide de la méthode de Hough. Nous cherchons dans l'étape suivante, lors de l'appariement des traces, à rassembler ces traces deux à deux pour construire des traces en trois dimensions. Finalement, nous essayons de reconstruire pour ces traces appariées des vertex d'interaction. Nous allons passer en revue

ces différentes étapes.

Sélection des évènements

La sélection des évènements est faite en trois étapes : tout d'abord la lecture des évènements puis le regroupement temporel des hits et enfin la véritable sélection des évènements. La lecture des évènements est faite en rassemblant les données du Module Proton et des modules standards d'INGRID. Un évènement passera cette étape si il comporte au moins un hit dans le Module Proton, et un total de six hits après que les informations des modules standards aient été ajoutées. Cette étape préliminaire sert simplement à vérifier que l'acquisition des données a correctement fonctionné.

Les hits sont ensuite regroupés par coïncidence temporelle. Nous construisons des ensembles de hits repartis dans une fenêtre de temps de 50 ns. Cette étape permet d'éliminer une partie du bruit électronique du détecteur qui produit des hits non corrélés en temps avec les hits provenant de l'interaction. Nous appellerons par la suite un tel regroupement de hits *cluster*. Pour être conservé, un cluster doit comporter au moins 9 hits dans le Module Proton, car nous voulons reconstruire uniquement des évènements de ce module.

La sélection des évènements repose comme dans le cas des modules standards sur le principe des plans activés. Un plan est considéré comme activé si il possède des hits sur les deux projections. Pour conserver un cluster, le nombre de plans activés doit être au moins égal à 4. Il faut également que le dépôt moyen d'énergie sur les plans activés soit supérieur à 8 p.e. Cette sélection permet de s'assurer que le cluster correspond bien à un évènement.

Reconstruction de traces

Nous allons reconstruire des traces dans chaque cluster. Comme expliqué précédemment, les traces sont reconstruites indépendamment sur chaque projection à l'aide de la méthode de Hough. Contrairement à ce qui était fait au moment des études pour la conception du module, où nous nous limitions à deux traces par projection, nous allons reconstruire ici autant de traces que possible sur chaque projection.

Construction d'une trace sur une projection

La méthode de Hough fournit à partir d'un ensemble de hits des traces candidates. Ces candidates doivent vérifier certaines conditions :

- être constituées d'un nombre minimum de hits
- traverser un nombre minimum de plans de tracking
- ne pas contenir de discontinuités, c'est à dire de ne pas traverser plusieurs plans succesifs sans laisser de hits.

Le nombre de hits minimum est de 3 pour la première trace reconstruite. Dans un évènement de type CCQEL, l'une des traces provient du proton, qui est parfois arrêté rapidement dans le détecteur. Nous allons donc accepter que les traces suivantes ne comportent que deux hits, si l'une de leurs extrémités est située à moins de 8 cm de l'extrémité d'une autre trace, ce qui doit être le cas si les deux traces proviennent d'une même interaction ayant eu lieu dans le Module Proton.

Le nombre de plans minimum à traverser est de 3 pour la première trace, et de 2 pour les traces suivantes, pour les mêmes raisons que précédemment.

Ces choix sont justifiés par l'étude par simulation Monte Carlo de l'acceptance géométrique du détecteur. Dans cette étude, nous mesurons la proportion d'évènements qui sont reconstructibles en fonction du nombre minimum de hits demandé pour chaque trace. Un évènement est ici considéré comme reconstructible si au moins deux traces satisfont le critère du nombre minimum de hits. Les résultats de cette étude sont présentés dans la table 15.1.

Nous pouvons remarquer sur ce tableau que le paramètre qui influe le plus sur la proportion d'évènement reconstructible est le nombre de hits minimum pour la seconde trace. Nous voyons également que la proportion d'évènements CCQEL reconstructibles dépasse celle d'évènements non CCQEL si nous ne demandons que 2 hits pour la seconde trace. Comme l'objectif de cette étude est de reconstruire les évènements CCQEL, ce dernier paramètre sera conservé pour la reconstruction des évènements.

Nombre de hits demandés pour la première trace	5	5	4	4	3	3
Nombre de hits demandés pour la deuxième trace	5	4	4	3	3	2
Evènements CCQEL reconstituibles (%)	14.3	19.3	19.8	27.4	27.9	42.6
Evènements non CCQEL reconstituibles (%)	21.4	26.1	26.7	32.1	32.7	39.6

TABLE 15.1 – Acceptance du Module Proton en fonction du nombre de hits minimum demandé par trace

Nous devons maintenant choisir parmi les candidats restants la trace reconstruite. Le paramètre privilégié est la longueur de la trace reconstruite, en choisissant la trace qui traverse le plus de plans du détecteur. En cas d'égalité entre plusieurs candidats, nous conserverons la trace la mieux reconstruite géométriquement, c'est à dire celle qui donne la meilleure interpolation linéaire (plus petit χ^2 obtenu lors de l'interpolation par méthode des moindres carrés).

Gestion des discontinuités dans les traces reconstruites

Nous demandons qu'une trace ne comporte pas de zones sans hits. Pour cela il faut identifier de telles zones dans les traces candidates, et modifier la trace pour éliminer cette discontinuité. L'algorithme utilisé repose sur la notion de numéro de plans généralisé, qui sera également utilisée dans les étapes suivantes.

Nous allons définir pour un hit son numéro de plan généralisé. Chaque module comporte un certain nombre de plans de tracking (11 pour un module standard et 18 pour le Module Proton). Le faisceau de neutrinos traverse successivement les modules verticaux, puis le Module Proton et enfin les modules horizontaux. Les plans de chacun de ces modules peuvent donc être ordonnés selon cet axe, en leur donnant un numéro compris entre 0 et 39. Les plans des modules verticaux auront un numéro compris entre 0 et 10, ceux du module proton entre 11 et 28 et ceux des modules horizontaux entre 29 et 39.

Nous pouvons ensuite pour une trace construire une table d'occupation de ces plans généralisés, en rentrant pour chaque numéro de plan généralisé 1 si elle possède un hit dans un plan ayant ce numéro généralisé, et 0 sinon. Un trou dans la trace apparaîtra alors comme un 0 au milieu d'une suite de 1 dans cette table.

Nous savons cependant que les scintillateurs n'ont pas une efficacité de 100%. Un unique plan traversé par la trace sans laisser de hits ne signifie donc pas nécessairement qu'il y ait un problème au niveau de la reconstruction. Pour cette raison nous considérerons qu'il y a une discontinuité si deux plans successifs sont traversés par la trace sans laisser de hits. Une deuxième difficulté est que la trace ne traverse pas forcément tout le module : elle peut également sortir par un côté, et rentrer ultérieurement dans un autre module. Cela apparaîtra comme un trou dans la table d'occupation des plans généralisés, alors qu'il n'y a pas d'erreurs au niveau de la reconstruction. Pour résoudre ce problème, nous utiliserons l'équation de la trace reconstruite pour déterminer quels plans la trace traverse véritablement.

Lorsqu'une discontinuité est identifiée, la trace est modifiée en la scindant en deux parties au niveau de cette discontinuité. La sous trace comportant le plus de hits est celle qui sera conservée pour la suite de la reconstruction.

Opérations sur une trace reconstruite

Comme expliqué dans la partie 2, la reconstruction de la trace par la méthode de Hough n'est pas parfaite : la trace reconstruite comporte parfois des hits ne faisant pas partie de la trace, alors que d'autres hits pourtant proches de la trace reconstruite n'en font pas partie. Pour résoudre ces problèmes, les hits de la trace reconstruite situés à plus d'une certaine distance de cette trace sont retirés, et les hits extérieurs situés à moins de cette même distance de la trace sont ajoutés à cette trace.

Les scintillateurs de type INGRID et Scibar qui composent le Module Proton ont une largeur différente, la précision sur la position d'un hit varie donc pour ces deux types de scintillateurs. En conséquence, cette

distance est différente pour ces deux sortes de scintillateurs : elle est de 3.5 cm pour les scintillateurs de type INGRID, et de seulement 2 cm pour les scintillateurs de type SciBar.

Appariement des traces

Nous disposons désormais d'un ensemble de traces reconstruites sur chaque projection, en deux dimensions. Nous devons maintenant appairer chaque trace reconstruite sur une projection avec une trace de l'autre projection pour former une trace en trois dimensions. C'est une étape essentielle : tout d'abord elle permet de vérifier la validité des traces reconstruites, car une véritable particule laisse des traces compatibles sur chaque projection. Comme nous avons imposé des conditions assez faibles sur les traces en deux dimensions, notamment de ne demander que 2 hits pour certaines traces, il est possible que nous ayons reconstruit de fausses traces, non physiques. Il est ensuite important de bien associer les bonnes traces à deux dimensions : dans le cas où plusieurs particules ont traversé le détecteur, il faut absolument éviter d'appairer la trace verticale d'une particule avec la trace horizontale d'une autre. En effet, cela provoquerait des erreurs sur la topologie reconstruite de l'évènement, essentielle pour différencier les différents types d'interaction.

Cette opération commence par une sélection : seuls sont conservés les évènements pour lesquels nous avons pu reconstruire au moins deux traces sur chaque projection. En effet, nous voulons reconstruire des évènements de type CCQEL qui produisent deux particules chargées.

L'algorithme d'appariement fonctionne ensuite en deux étapes. Tout d'abord, la trace horizontale la plus longue est sélectionnée, et l'on cherche à l'appairer avec une trace verticale. Pour cela, des candidats sont sélectionnés parmi les traces verticales en demandant que les deux traces aient une origine et une fin situées à un plan de distance maximum en terme de plans généralisés. Si nous obtenons plusieurs traces candidates de cette manière, la trace verticale ayant la table d'occupation des plans généralisés la plus proche de celle de la trace horizontale est conservée.

La deuxième étape est effectuée sur les traces qui n'ont pas pu être appariées lors de la première étape. Elle se déroule de la même façon, mais la comparaison est limitée au niveau du Module Proton, sans utiliser l'ensemble des plans généralisés.

Reconstruction du vertex de l'interaction du neutrino incident

La dernière étape de la reconstruction consiste à reconstruire le vertex, c'est à dire le point où a eu lieu l'interaction. Seuls les évènements comportant au moins deux traces appariées sont conservés. Nous essayons de reconstruire un vertex pour chaque paire de traces appariées. Le vertex est tout d'abord reconstruit indépendamment dans chaque projection. Pour cela, nous déterminons le point d'intersection des traces en deux dimensions à l'aide des équations des traces reconstruites. Ce vertex est conservé si le point d'intersection est situé à moins de 12 cm d'une extrémité de chacune des deux traces. Nous vérifions ensuite la compatibilité des vertex reconstruits dans les deux projection, en demandant que leurs coordonnées sur l'axe définit par la direction du faisceau (z) soient distantes de moins de 15 cm.

Si cette condition est vérifiée, le vertex est conservé et nous cherchons ensuite à ajouter d'autres traces à ce vertex. Ces traces sont ajoutées si dans chaque projection leur extrémité est situé à moins de 12 cm de la position du vertex.

Une coupure fiducielle est finalement appliquée, comme dans le cas des évènements reconstruits dans les modules standards, pour s'assurer que le vertex reconstruit correspond bien à une interaction ayant eu lieu dans le module. Pour que l'évènement passe cette coupure, il faut que l'un au moins des vertex reconstruits soit situé à plus de 10 cm des bords du module dans les plans horizontaux et verticaux, et que sa dernière coordonnée soit située entre les plans 2 et 15 du Module Proton.

15.3 Performances de la reconstruction

Des exemples d'évènements reconstruits dans les données sont présentés sur les figures 15.1 et 15.2 où les traces appariées sont représentées par la même couleur sur les deux projections, et le vertex reconstruit est représenté par un carré en pointillé rouge. Les carrés noirs correspondent aux modules.

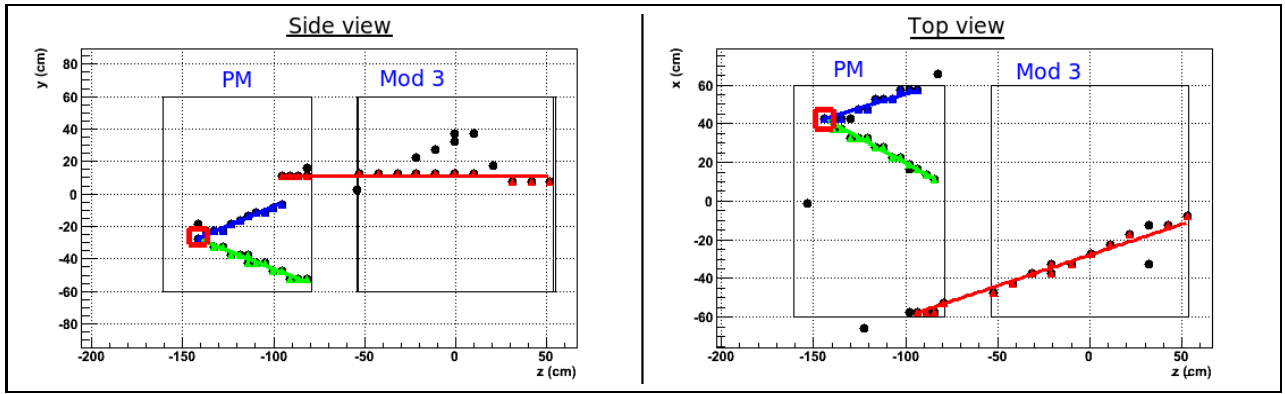


FIGURE 15.1 – Evènement reconstruit dans le Module Proton (et un module standard), comportant une interaction produisant deux particules chargées (en vert et bleu) et une particule produite à l'extérieur du module (en rouge).

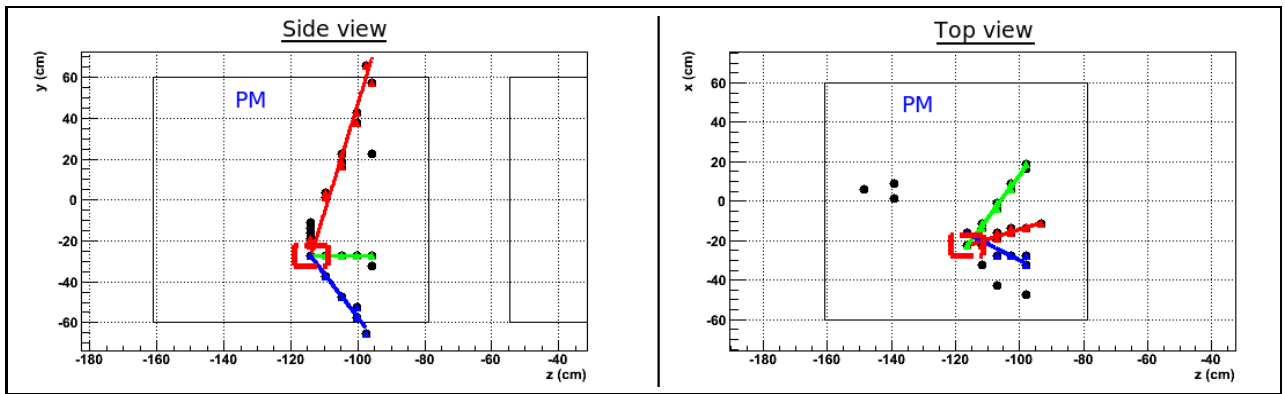


FIGURE 15.2 – Evènement reconstruit dans le Module Proton, comportant une interaction produisant trois particules chargées.

Précision de la reconstruction

Pour l'évaluer, nous allons regarder la précision avec laquelle sont reconstruits la position du vertex et l'angle d'ouverture (angle entre la trajectoire du muon et celle du proton). Comme dans la partie 2, seuls les évènements de type CCQEL sont considérés, et nous sélectionnons les évènements qui ont passé toutes les étapes de la reconstruction, pour lesquels un vertex a été reconstruit à l'intérieur du volume fiduciel. Nous allons tout d'abord nous intéresser à la position du vertex, en étudiant la différence entre la position reconstruite de ce vertex et sa position réelle (connue pour les évènements simulés). Les résultats pour les coordonnées x et y du vertex sont présentées sur la figure 15.3.

Ces distributions montrent que pour la grande majorité des évènements, les erreurs sont inférieures à 3 cm. La largeur d'un scintillateur de type INGRID est de 5 cm, ce qui donne une précision sur la position des hits de 2.5 cm, soit du même ordre. Pour les scintillateurs de type SciBar la précision serait de 1.25 cm. Or, il semble que le centre de ces distributions comportent un nombre important d'évènements ayant une erreur inférieure à 1.5 cm. Nous pouvons penser que ces distributions d'erreur sont en fait la somme de deux distributions, l'une pour laquelle le vertex serait reconstruit à l'aide des scintillateurs de type INGRID, et l'autre pour laquelle les traces des particules passent par un certain nombre de scintillateurs de type SciBar, donnant une meilleure précision pour la reconstruction. Cela expliquerait la forme de ces distributions, en particulier leur forme non gaussienne.

La précision de notre reconstruction est importante, car pour la coupure fiducielle, les évènements pour

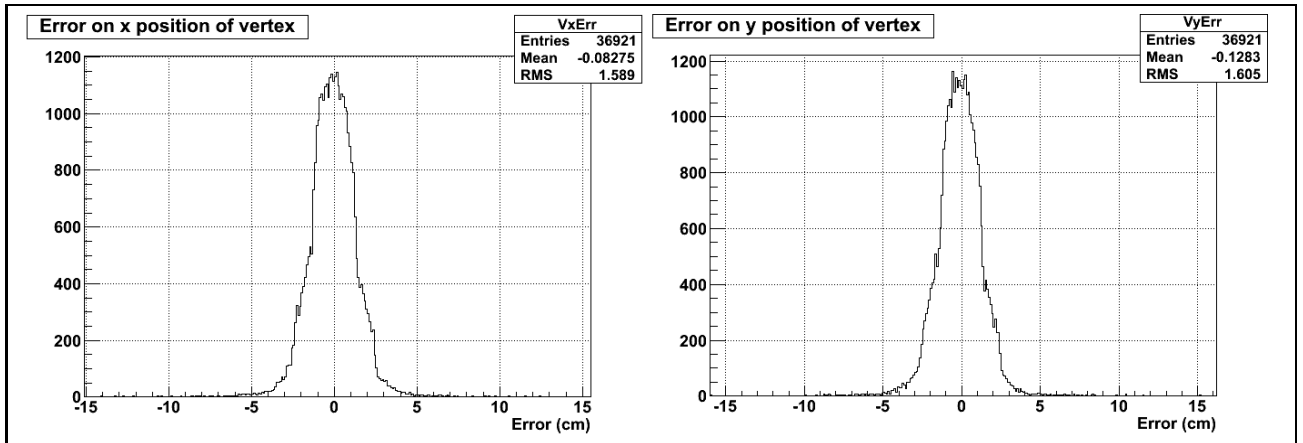


FIGURE 15.3 – Distribution des erreurs sur la position du vertex reconstruit, coordonnée x (à gauche) et y (à droite).

lesquels l'une de ces deux coordonnées est située à moins de 10 cm du bord du module sont retirés. Une erreur trop importante sur ces coordonnées pourraient donc entraîner une erreur au niveau de la coupure fiducielle.

Nous allons maintenant nous intéresser à la précision de la reconstruction de l'angle d'ouverture, en regardant la distribution de la différence entre la valeur reconstruite et la valeur véritable de cet angle pour les événements CCQEL (figure 15.4).

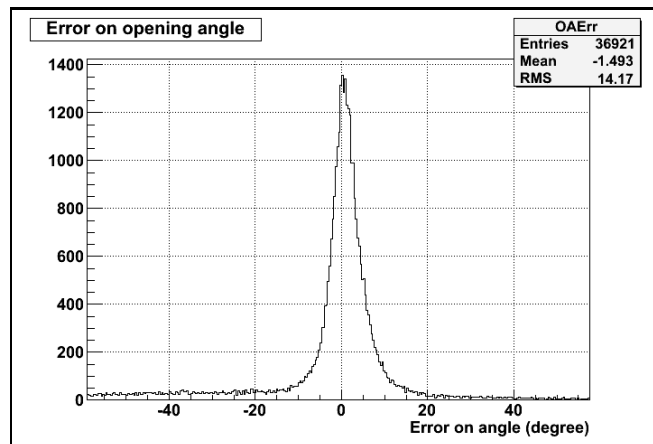


FIGURE 15.4 – Erreur sur la reconstruction de l'angle d'ouverture pour les événements CCQEL

Pour la majorité des événements, cet angle semble bien reconstruit, la distribution de l'erreur n'est cependant pas totalement symétrique. Nous pouvons en particulier remarquer une queue de distribution élevée dans la zone d'erreur négative, c'est à dire pour laquelle la valeur de l'angle reconstruit est supérieure à la valeur du véritable angle. En interpolant le centre de la distribution par une fonction gaussienne, nous obtenons néanmoins un écart type très raisonnable de 3.24° .

Efficacité de la reconstruction

Nous pouvons maintenant mesurer le pourcentage d'événements CCQEL reconstruits avec cette méthode. Nous allons pour cela utiliser deux grandeurs : tout d'abord l'acceptance, c'est à dire le pourcentage

d'évènements potentiellement reconstituables étudié précédemment. Au vu des critères de sélection des traces utilisés pendant la reconstruction, nous allons considérer qu'un évènement est reconstituable si il possède une trace qui a laissé au moins 3 hits sur chaque projection, et une seconde trace qui a laissé au moins 2 hits sur chaque projection. La deuxième grandeur est l'efficacité de tracking, c'est à dire le pourcentage d'évènements ayant passé le test d'acceptance qui sont effectivement reconstruits. Les résultats pour l'échantillon d'évènements CCQEL simulés pour cette étude sont présentés en table 15.2.

Nombre d'évènements simulés	91291
Acceptance (%)	44.8
Efficacité de tracking (%)	60.0
Fraction totale reconstruite (%)	26.9

TABLE 15.2 – Efficacité de reconstruction du Module Proton.

Nous pouvons remarquer que la fraction totale d'évènements reconstruits est plus faible que ce que ce qui était obtenu dans la partie 2. Néanmoins les efficacités de tracking sont très proches : elle est ici de 60.0%, contre 63.7% obtenu avec l'ancienne méthode de reconstruction (après sélection des évènements bien reconstruits). La différence vient donc de l'acceptance : elle était de 63.78% dans les études menées au moment de la conception du module, et elle n'est ici que de 44.8%. Cette différence provient du changement de simulation Monte Carlo utilisée. Nous avons mentionné en conclusion de la partie 2 certaines faiblesses de la simulation, en particulier l'absence de simulation électronique. Cela avait pour conséquence de produire un hit dans un scintillateur avec une énergie fixe dès qu'une particule parcourait une distance infime dans ce scintillateur. Ce n'est plus le cas ici, où l'énergie déposée dépend notamment de la distance parcourue dans le scintillateur. Le nombre de hits produit par une particule dans la simulation a donc diminué, notamment pour les particules qui parcourt une faible distance dans le détecteur.

Cette efficacité de reconstruction est valable pour les évènements Monte Carlo utilisés ici. Cependant, cette efficacité dépend de l'énergie du neutrino incident, comme montré en figure 15.5. Pour obtenir l'efficacité de tracking, il faut multiplier cette distribution par la distribution en énergie des neutrinos du faisceau ayant interagi dans le détecteur, que l'on obtient à l'aide de la simulation JNUBEAM et de la méthode des tables de section efficace employée dans la partie précédente. Nous obtenons alors une fraction totale reconstruite de 35.4% pour les évènements CCQEL du faisceau. Cela confirme notamment que la distribution en énergie des neutrinos de l'échantillon simulé ne correspond pas à la distribution en énergie des neutrinos du faisceau.

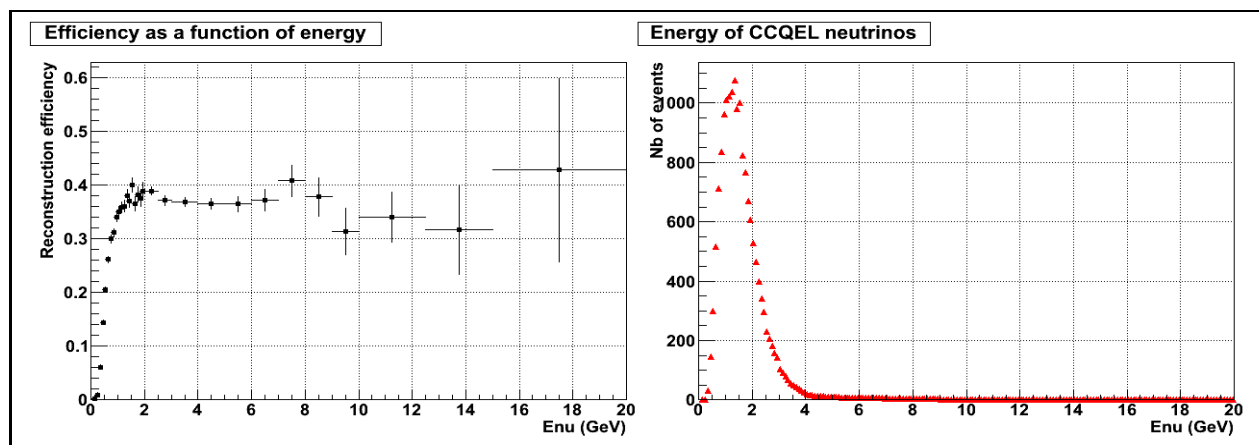


FIGURE 15.5 – Figure de gauche : efficacité de reconstruction en fonction de l'énergie pour les évènements CCQEL. Figure de droite : distribution de l'énergie des neutrinos interagissant dans le Module Proton pour les interactions CCQEL.

La figure 15.5 semble contredire certains résultats dans la partie 2 : nous avons en effet étudié à ce moment l'impact de la reconstruction sur le plan de phase. Nous n'avons alors pas trouvé de différences entre les distributions en énergie de l'ensemble des événements, et des événements reconstruits. Or ici l'efficacité varie avec l'énergie du neutrino incident, ces deux distributions vont donc être différentes. Le changement de méthode de reconstruction n'est probablement pas la source de cette différence de résultats. Elle vient probablement de la simulation. Le fait que nous disposions maintenant d'une simulation complète des scintillateurs et MPPC associés, comme expliquée précédemment, a probablement joué un rôle. Une seconde modification est le changement de "physics list" dans Geant4. Cette liste décrit l'ensemble des processus physiques pris en compte, et leur paramétrisation en fonction de l'énergie des particules. Nous avons utilisé dans cette partie une liste bien plus précise que celle employée au moment des études de conception du module.

Chapitre 16

Analyse des premières données du Module Proton

Nous allons présenter dans ce chapitre une analyse préliminaire des premières données du Module Proton. Le calendrier de son installation et sa mise en route n'ont pas permis d'effectuer une analyse plus complète et plus rigoureuse.

16.1 Prise des données

Le Module Proton fut construit et installé dans le puit 280m pendant l'été 2010. Il n'était pas encore présent pour le run 2010a dont les données ont été étudiées dans la partie précédente. Nous allons ici utiliser les données correspondant à la période suivante, baptisée 2010b, pour présenter les premiers résultats obtenus à l'aide de ce module.

Les problèmes au niveau des aimants "kicker" qui limitaient l'intensité du faisceau ont pu être résolus dans la période séparant les runs 2010a et 2010b, ce qui a permis une montée en intensité du faisceau lors de cette deuxième période de prise de données. Cette augmentation de l'intensité est visible sur la figure 16.1.

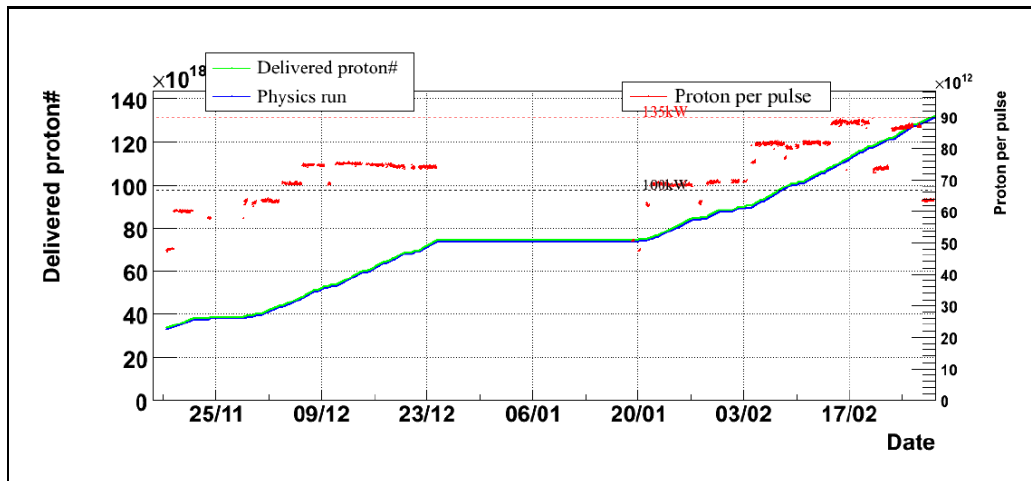


FIGURE 16.1 – Intensité du faisceau pour les runs 36 et 37.

L'objectif initial pour le run 2010b était de poursuivre l'augmentation de l'intensité jusqu'à une puissance de faisceau de 150kW, et de poursuivre la prise de données jusqu'à la fin juin 2010. Ce run fut malheureusement stoppé par le tremblement de terre ayant frappé l'est du Japon le 11 mars 2011, pendant

le run faisceau 38. Nous disposons donc des trois runs 36, 37 et 38 pour le Module Proton. Devant les difficultés pour obtenir les dernières données suite à l'arrêt des centres de calcul japonais ayant suivi le tremblement de terre, il a été décidé de se concentrer pour ces premières analyses sur les données des runs 36 et 37. Les caractéristiques de ces deux runs sont résumées dans la table 16.1, où l'on peut voir qu'ils totalisent l'équivalent de trois fois la période 2010a en termes de POT.

Runs	Protons sur cible	Nombre de tirs du faisceau utilisables
36	4.19×10^{19}	601344
37	5.75×10^{19}	747993
Total	1.06×10^{20}	1349337

TABLE 16.1 – Runs faisceau lors de la seconde période de prise de données.

Le détecteur INGRID a fonctionné avec les mêmes réglages que pour le run 2010a, la différence principale étant la présence de trois modules supplémentaires : deux modules hors croix et le Module Proton. Le détecteur a fonctionné de façon très stable durant cette période. Le seul problème notable fut un problème de corruption de fichier pendant le run 37 qui a entraîné la perte des données correspondant à un sous-run de ce run. La proportion de temps où le détecteur était opérationnel pour enregistrer les données du faisceau reste cependant élevée, avec 99.99% pour le run 36 et 99.3% pour le run 37.

16.2 Alignement des modules

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la reconstruction des événements est ici faite en utilisant toutes les informations de tous les modules à la fois pour reconstruire des traces passant par plusieurs modules. Cela n'est possible que si les positions relatives des modules sont connues précisément. Dans le cas contraire, certaines traces pourraient être scindées en deux à cause d'un problème d'alignement. Un exemple d'un tel cas est présenté en figure 16.2. Dans cet événement, une particule traverse les module 3, 10 et le Module Proton. La trace est correctement reconstruite dans les scintillateurs verticaux, mais elle est par contre reconstruite sous forme de deux traces différentes dans les scintillateurs horizontaux.

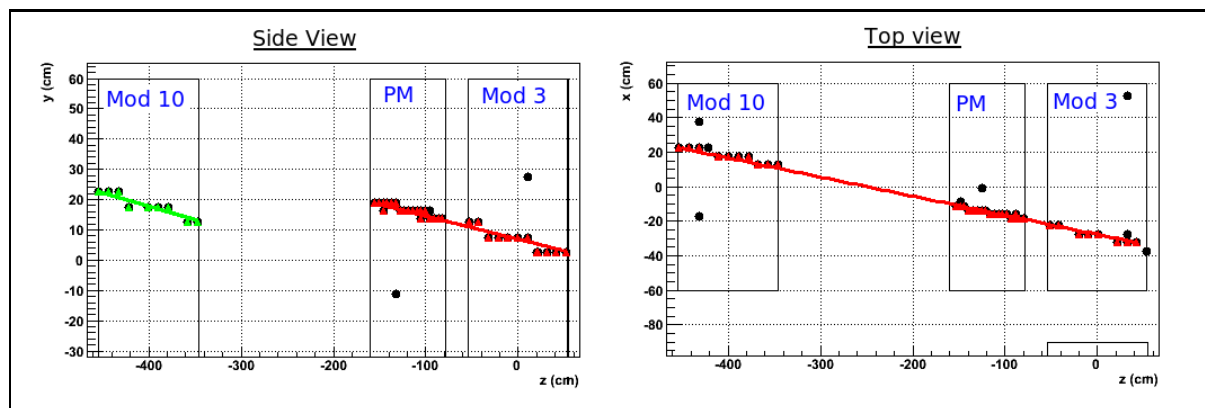


FIGURE 16.2 – Evènement mal reconstruit à cause d'un problème d'alignement des modules.

Ce problème d'alignement provient d'un mauvais positionnement relatif des modules horizontaux et verticaux dans le programme de reconstruction. Nous disposons cependant de mesures précises sur les positions des modules, faites après leur installation. Ces mesures permettent de connaître précisément la différence de position entre les centres des module 10 (module vertical central) et 3 (module horizontal central) :

- coordonnée x : -3.8 cm

- coordonnée y : +17.3 cm
- coordonnée z : -400.9 cm

Ces corrections permettent de résoudre le problème, comme le montre un autre évènement présenté sur la figure 16.3.

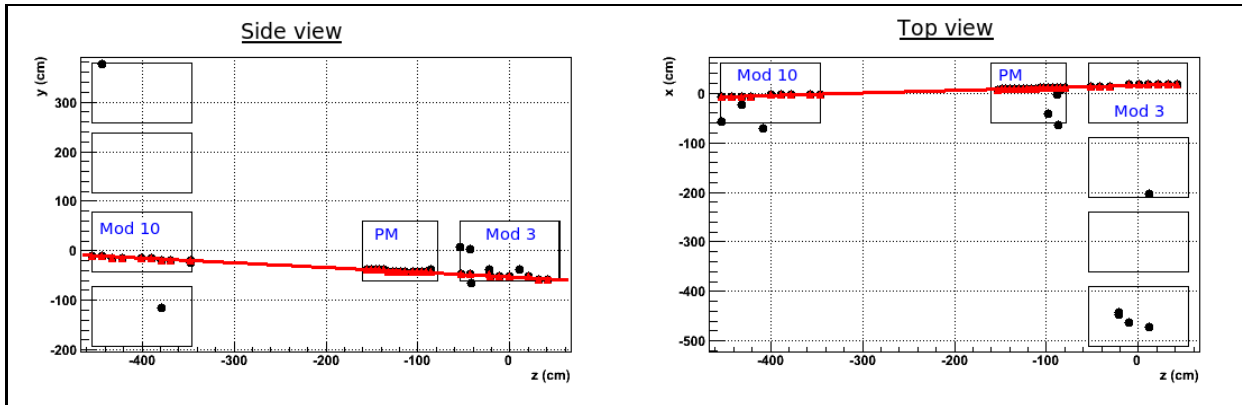


FIGURE 16.3 – Evènement traversant trois modules et correctement reconstruit.

Une étude systématique de l'ensemble de ce type d'évènements montre que l'alignement des 15 modules (les modules hors croix n'ont pas été étudiés) est correct dans les incertitudes du programme de reconstruction.

16.3 Séparation des interactions

Nous allons maintenant chercher à sélectionner les évènements de type CCQEL parmi les évènements reconstruits. Cette sélection est faite en utilisant une méthode de vraisemblance, comme celle exposée dans la partie 2. Le nombre de variables employées est plus réduit qu'au moment des études de conception du module, car une comparaison entre les distributions attendues par simulation et mesurées dans les données étaient différentes pour certaines variables de sélection. Dans le cadre de cette étude préliminaire, il a été décidé de faire une première sélection plus simple, en n'utilisant que quatre variables de sélection :

- le nombre de vertex reconstruits
- le nombre de traces reconstruites et appariées
- le nombre de traces reconstruites mais non appariées
- l'angle d'ouverture entre les deux traces

Nous allons considérer toutes les interactions se produisant pour des neutrinos muons. Les évènements seront répartis en trois catégories pour ces études : CCQEL, interactions 12 et 13 (les bruits de fond principaux, étudiés au moment de la conception du module), et toutes les interactions restantes. Nous pouvons construire à partir de ces catégories les distributions de la variable de vraisemblance pour le signal et pour le bruit de fond. Le signal est constitué uniquement des évènements CCQEL, le bruit de fond est construit à partir des deux catégories interactions 12 et 13 et autres interactions, affectées chacune d'un poids correspondant au nombre d'évènements attendus pour chacune de ces catégories. Enfin, les évènements simulés sont affectés de poids pour obtenir une distribution en énergie conforme à celle prévue pour les évènements du faisceau. Les distributions finales pour le signal et le bruit de fond sont présentées en figure 16.4.

Nous pouvons voir pour le signal un pic pour les hautes probabilités, et pour le bruit de fond un pic au niveau des basses probabilités. Cette méthode permet donc bien de séparer le signal du bruit de fond. Cette variable de probabilité semble néanmoins moins discriminante que celle présentée en partie 2 : cela provient de la diminution du nombre de variables utilisées pour cette probabilité. Le rapport signal sur bruit sera calculé à partir du nombre d'évènements attendus. Au vu de ces distributions, il a été décidé pour cette première étude d'effectuer la coupure pour une valeur de la probabilité de 0.6. Il pourrait sembler préférable de choisir 0.8, car le rapport signal sur bruit semble constant sur le domaine

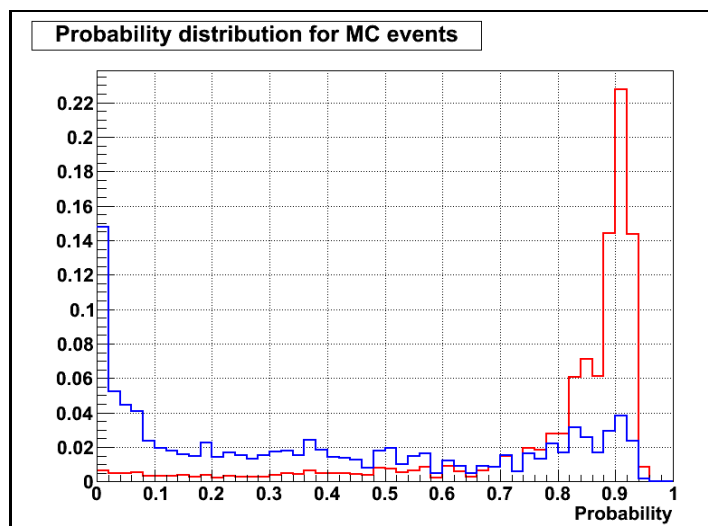


FIGURE 16.4 – Distribution de la variable de vraisemblance pour le signal (en rouge) et le bruit de fond (en bleu).

[0.6, 0.8] sur ces distributions normalisées. Comme le nombre d'évènements attendus est supérieur pour le bruit de fond cela améliorerait le rapport signal sur bruit. Cependant, comme nous le verrons plus tard, il existe des différences entre les distributions des probabilités attendues par simulation et mesurées dans les données pour les hautes probabilités. Il a donc été décidé de prendre de façon conservative une coupure plus modeste à 0.6 pour cette première analyse.

16.4 Nombre d'évènements attendus

Nous allons calculer le nombre d'évènements attendus pour un nombre de POT donné dans deux cas : tout d'abord le nombre d'évènements reconstruits dans le volume fiduciel, puis le nombre d'évènements attendus après sélection par la méthode de vraisemblance. Ces nombres seront calculés pour chacune des trois catégories d'évènements présentées dans la section précédente.

La méthode employé pour ce calcul est la méthode utilisant les tables de sections efficaces utilisée au moment de l'étude des données d'INGRID dans la partie 4. La première étape consiste à calculer le nombre d'interactions se produisant dans le volume fiduciel à partir des tables de sections efficaces. Ces tables sont présentées sur la figure 16.5.

La seconde calcule la proportion d'évènements qui sont ensuite reconstruits par l'algorithme : il s'agit de l'efficacité de tracking. Cette efficacité dépend entre autres de l'énergie du neutrino incident, comme le montre la figure 16.6 qui présente l'efficacité de tracking après sélection des évènements par la méthode de vraisemblance.

Nous sommes désormais en mesure de calculer les nombres d'évènements attendus et le rapport signal sur bruit. Ces nombres sont présentés dans la table 16.2, pour 10^{21} POT, ce qui correspond à une année de prise de données avec l'intensité nominale de l'expérience T2K.

Le nombre d'évènements est suffisamment important pour obtenir des résultats valides statistiquement sur une année de prise de données à l'intensité nominale. Nous voyons également que la sélection des évènements améliore le rapport signal sur bruit d'un facteur 3. La valeur finale de ce rapport est cependant nettement inférieure à celle que l'on obtenait dans la partie 2. Il y a deux raisons principales à cela : tout d'abord nous n'avions considéré dans la partie 2 que les interactions 12 et 13 comme bruit de fond. Or il semble ici que les trois quarts du bruit de fond proviennent en fait des autres interactions. Cela peut sembler surprenant, car ces interactions produisent plus que 2 particules chargées, ce qui devraient se traduire par plus de 2 traces reconstruites pour l'évènement. Ce n'est en fait pas toujours le cas : il se peut que dans une projection, deux traces fassent un angle très faible. Alors dans cette projection une

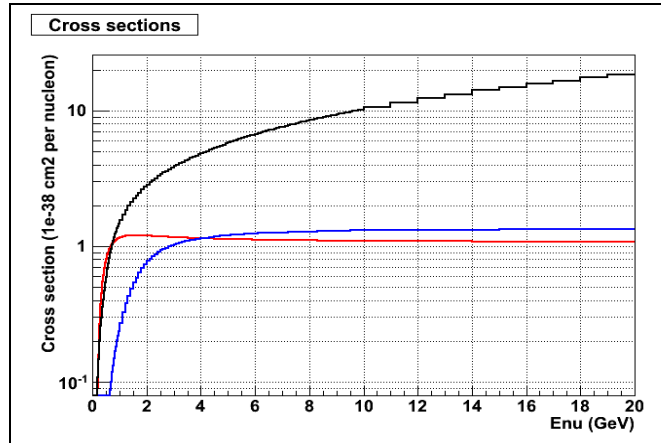


FIGURE 16.5 – Section efficaces pour les interactions CCQE (en rouge), les interactions 12 et 13 (en bleu) et les autres interactions (en noir) en fonction de l'énergie du neutrino.

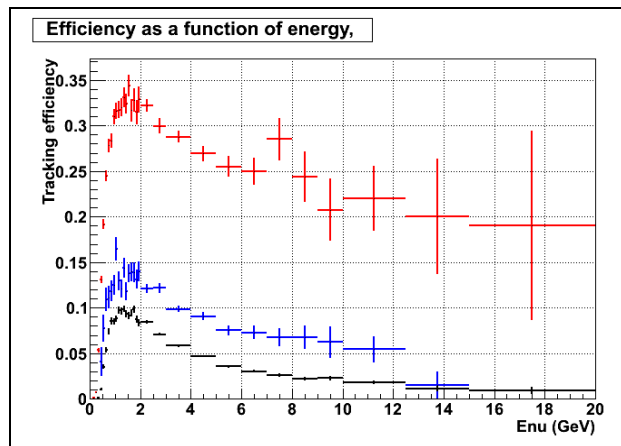


FIGURE 16.6 – Efficacité de tracking après sélection des interactions pour les interactions CCQE (en rouge), les interactions 12 et 13 (en bleu) et les autres interactions (en noir) en fonction de l'énergie du neutrino.

seule trace est reconstruite à la place des deux attendues. Ce problème devrait pouvoir être réglé par une amélioration de l'algorithme de reconstruction, ce qui permettrait une forte réduction du bruit de fond dans les analyses ultérieures. Il faut également noter que le nombre de variables utilisées a diminué, ce qui donne une sélection moins efficace des interactions. Enfin, il s'agit d'une étude préliminaire qui reste à améliorer.

16.5 Comparaison avec les données

Nous allons nous intéresser aux résultats mesurés avec les données des runs 36 et 37. Nous allons tout d'abord comparer les nombres d'évènements reconstruits dans le volume fiduciel et sélectionnés par la méthode de vraisemblance (table 16.3). Nous pouvons remarquer que les nombres de POT diffèrent de ceux présentés dans le chapitre précédent. Il s'agit ici des nombres de POT pour lesquels nous avons effectivement des données enregistrées par le Module Proton. Le problème de corruption d'un sous run entre autres explique les différences avec le nombre de POT pour lesquels l'accélérateur fonctionnait correctement.

Interactions	Evènements reconstruits dans le volume fiduciel	Evènements sélectionnés par vraisemblance
CCQEL	32858±181	28374±168
12 et 13	12419±111	4825±69
Autres	49391±222	14083±119
Total	94668±308	47282±217
Signal sur bruit	0.53	1.5

TABLE 16.2 – Nombres d’évènements attendus dans le Module Proton pour 10^{21} POT. Erreur statistique uniquement.

Run	36		37	
Protons sur cible	3.53×10^{19}		4.99×10^{19}	
Type d’évènements	Reconstruits	Sélectionnés	Reconstruits	Sélectionnés
Attendus par simulation	3342±58	1669±41	4723±69	2359±49
Mesuré	3241±57	1262±36	4333±66	1679±41
Mesuré sur attendu	0.97	0.76	0.92	0.71

TABLE 16.3 – Comparaison des nombres d’évènements mesurés et attendus pour les runs 36 et 37.

Au niveau du nombre d’évènements reconstruits dans le volume fiduciel, l’accord est bon entre les nombres d’évènements attendus et mesurés. Pour le run 36, les deux valeurs sont même compatibles lorsque l’erreur statistique est prise en compte. Cependant, la méthode employée pour calculer le nombre d’évènements attendus est la même que celle employée pour l’analyse des données des modules standards d’INGRID, pour lesquelles le nombre d’évènements mesuré était supérieur d’environ 5% à la valeur attendue par simulation. La différence est ici du même ordre, mais dans le sens opposé. Il y a plusieurs explications possibles à cela : tout d’abord le nombre d’évènements attendus est calculé ici en séparant les interactions en trois catégories, et non plus en utilisant les résultats intégrés sur toutes les interactions. Sachant que l’efficacité de tracking est différente pour ces trois catégories d’interactions, le résultat sera différent si la proportion de ces trois catégories est incorrecte. Ensuite, un autre effet possible vient de l’appariement des traces. Nous avons vu pour le calcul des erreurs systématiques pour les modules standards que les effets d’une variation de cette coupure n’étaient pas correctement reproduits par les données. Or la méthode d’appariement des traces utilisées ici est plus contraignante que dans le cas des modules standards. L’efficacité de tracking étant calculée par simulation, ceci introduit sans doutes une erreur supplémentaire.

L’accord est moins bon au niveau du nombre d’interactions sélectionnées, avec un déficit du nombre d’évènements mesurés allant jusqu’à 30%. Il y a deux interprétations possibles à cela : soit la méthode de séparation ne fonctionne pas correctement, soit la proportion d’évènements CCQEL dans les évènements reconstruits est inférieure à celle prévue. Cela pourrait par exemple être le cas si parmi ces évènements il n’y avait pas uniquement des évènements du Module Proton, mais également des traces provenant d’interactions extérieures reconstruites par erreur à l’intérieur du module.

Nous pouvons calculer une distribution attendue de la variable de probabilité à partir de la simulation, et la comparer à celle des évènements provenant des données, le résultat est présenté en figure 16.7.

Nous pouvons voir que dans l’ensemble les deux distributions sont proches, sauf au niveau des extrêmes, c’est à dire aux endroits où les distributions du signal et du bruit de fond ont leur pic. Nous pouvons mesurer la proportion d’évènements qui passe la coupure de sélection des interactions dans les différents cas :

- simulation : 49.9%

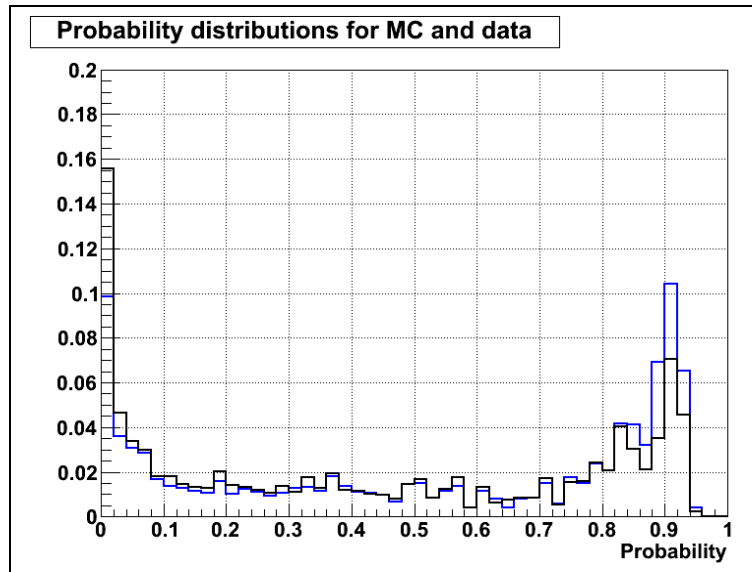


FIGURE 16.7 – Distributions de la variable de vraisemblance attendue par simulation (en bleu) et mesuré pour les évènements du run 37 (en noir).

- run 36 : 38.9%
- run 37 : 38.7%

Les résultats sont homogènes pour les données, mais la différence relative entre les données et la simulation est de -22%. Comme mentionné précédemment, ces différences pourraient avoir une origine théorique : les proportions d'évènements CCQEL et des autres interactions sont calculées à partir des tables de section efficace du logiciel NEUT. Or ces sections efficaces ne sont pas parfaitement connues aux énergies considérées ici. Cependant, la méthode de séparation ne paraît pas suffisamment fiable pour conclure sur ce point pour l'instant. Nous allons étudier certaines causes d'erreur dans cette sélection, dont la correction permettrait d'améliorer cette sélection et éventuellement d'obtenir ultérieurement un résultat à ce sujet.

16.6 Sources d'erreur et possibilités d'amélioration de la sélection des interactions

Topologie des évènements

Comme expliqué précédemment, nous avons dû réduire dans cette étude préliminaire du Module Proton le nombre de variables utilisées dans la méthode de sélection. L'une des variables éliminées décrit la topologie de l'évènement : il s'agit du nombre de hits non utilisés dans les traces. C'est une variable a priori utile, car les évènements de type profondément inélastique produisent un grand nombre de particules, ce qui se traduit par un cluster de hits autour du vertex. Cependant, cette variable n'est utilisable que si la simulation Monte Carlo reproduit correctement la topologie des évènements. Nous pouvons pour cette variable calculer sa distribution attendue d'après la simulation, et la comparer aux données (figure 16.8).

Les distributions simulées et mesurées ne sont clairement pas compatibles : il y a beaucoup plus de hits inutilisés dans les données que ce qui était attendu. Une cause possible pour cet effet serait le bruit électronique du détecteur. En effet, les hits de bruit apparaissent à des endroits aléatoires et seront donc probablement des hits inutilisés dans les traces. Cependant, ce bruit a été mesuré dans les données et ajouté aux évènements simulés, à l'aide du générateur présenté au moment de l'étude de l'effet du bruit sur le nombre d'évènements reconstruits dans les modules standards. De plus, nous mesurons en moyenne dix hits de bruit par cycle dans le Module Proton, ces hits étant répartis avec la même distribution temporelle

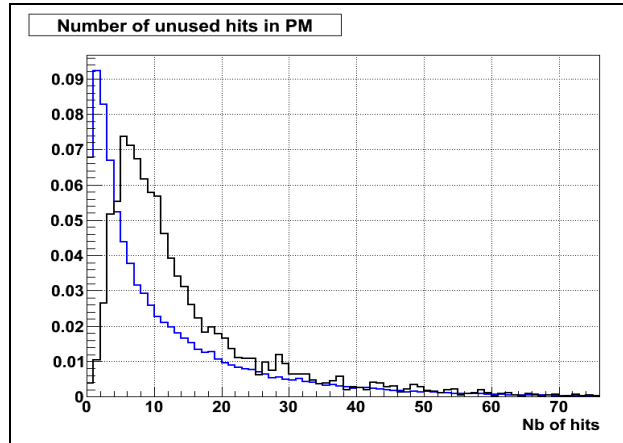


FIGURE 16.8 – Distributions du nombres de hits inutilisés attendue par simulation (en bleu) et mesuré pour les évènements du run 37 (en noir).

que les pour les modules standards (voir figure 12.26). Nous pouvons calculer le nombre de hits de bruits se produisant en coïncidence avec la fenêtre de temps correspondant à un évènement du faisceau : nous obtenons alors 1.4 hits de bruits par évènement, ce qui est insuffisant pour expliquer la différence entre les données et la simulation.

L’autre explication possible tient à la simulation électronique du détecteur, c’est à dire la modélisation de l’énergie recueillie par un scintillateur lorsqu’il est traversé par une particule, ce qui détermine si un hit est produit ou non. Il est possible que la simulation actuelle ne produise pas suffisamment de hits. La simulation d’INGRID va prochainement “migrer” vers la simulation globale des détecteurs proches développée par les groupes du ND280. Cette simulation possède une simulation électronique détaillée, qui permettra éventuellement de résoudre ce problème. Cela permettrait d’utiliser la variable du nombre de hits inutilisés, et donc d’améliorer la sélection des interactions. Cela pourrait également avoir un impact au niveau de la reconstruction des évènements, au niveau de l’étape d’appariement des traces qui peut échouer en cas de hits manquants, ou de hits supplémentaires. Il serait donc utile de refaire cette étude avec la nouvelle simulation Monte Carlo, pour tester ces hypothèses et éventuellement améliorer les résultats.

Une autre explication provenant de la simulation tient à la “physics list” employée pour cette simulation, QGSP. Comme nous l’avons dit précédemment, elle est beaucoup plus précise que celle employée pour les études de conception du Module Proton. Elle est cependant optimisée pour des énergies supérieures à celle des particules détectées ici, et elle ne modélise pas parfaitement les interactions des neutrons. Elle possède de plus un paramètre ajustable, la longueur minimum que la particule doit parcourir dans un matériau pour être créée par la simulation. Ce paramètre a pour l’instant été laissé à sa valeur par défaut, mais il influe sur le nombre de particules créées, et donc le nombre de hits présents dans un évènement simulé. Il est donc envisagé de refaire cette étude après avoir étudié en détails le choix de la “physics list”.

Interactions à l’extérieur du Module Proton

Nous avons, pour calculer le nombre d’évènements attendus, uniquement considéré les évènements dont le vertex d’interaction produit par un ν_μ incident était situé à l’intérieur du Module Proton. Il se peut cependant que certains évènements provenant de l’extérieur du module soient reconstruits par erreur à l’intérieur du module. Nous allons étudier ici cette contamination, en considérant quatre types d’interactions extérieures :

- les interactions ayant lieu dans les modules verticaux standards
- les interactions ayant lieu dans les modules horizontaux standards
- les muons “de la roche”
- les rayons cosmiques.

Nous allons mesurer pour chaque type la proportion d'évènements qui est reconstruite et celle qui passe la coupure de sélection des interactions. Les interactions ayant lieu dans les modules horizontaux et verticaux ainsi que les muons de la roche sont simulés par Monte Carlo, alors que les rayons cosmiques sont issus des prises de données d'évènements cosmiques. Les résultats sont résumés dans la table 16.4.

Type d'évènements	Modules horizontaux	Modules verticaux	Muons de la roche	Cosmiques
Reconstruits (%)	0.003	0.04	0.14	0.9
Sélectionnés (%)	0.0001	0.01	0.03	0.07

TABLE 16.4 – Efficacité de tracking pour les interactions ayant lieu à l'extérieur du Module Proton

A l'aide de cette efficacité de tracking, nous pouvons calculer le nombre d'évènements attendus pour chacune de ces catégories pour 10^{21} POT, les résultats sont présentés dans la table 16.5.

Type d'évènements	Modules horizontaux	Modules verticaux	Muons de la roche	Cosmiques	Total
Nombre d'interactions	7.25×10^6	7.62×10^6	3.36×10^6	648	1.82×10^7
Reconstruits	218	3048	4704	58	8028
Sélectionnés	7.2	762	1008	0.45	1778

TABLE 16.5 – Nombres d'évènements attendus pour 10^{21} POT pour les interactions ayant lieu à l'extérieur du Module Proton

Les nombres d'interactions pour les modules horizontaux et verticaux sont calculés de la même façon qu'au moment de l'analyse des données d'INGRID. Pour les muons de la roche, nous avons considéré que le nombre de muons de la roche traversant le Module Proton était identique à celui du module horizontal central, car il sont situés à la même distance du centre du faisceau, et à une faible distance l'un de l'autre. Enfin, le chiffre fourni pour les évènements cosmiques est sujet à caution : en l'absence d'une méthode fiable pour évaluer le taux d'évènements cosmiques, nous avons utilisé le taux de contamination des données calculé au moment de la calibration d'INGRID dans la partie 4. Il s'agit d'un choix par défaut, et il faudra chercher une meilleure méthode d'estimation de ce taux pour les analyses finales. Avec cette méthode, la contamination obtenue est très faible pour les évènements cosmiques. Ce n'est pas surprenant car la méthode de coïncidence temporelle avec un faisceau pulsé permet normalement de réduire très fortement la contamination par les rayons cosmiques.

Au niveau des résultats, il semble y avoir deux sources de contamination majeures : les interactions ayant lieu dans les modules verticaux, et les muons de la roche. Il faut cependant noter que la statistique de l'échantillon utilisé pour les muons de la roche était assez limitée, il pourrait se révéler utile de refaire l'étude avec plus d'évènements simulés. Nous pouvons désormais comparer ces résultats aux nombres d'évènements attendus dans le Module Proton. Nous obtenons alors une contamination significative des évènements mesurés dans les données, de respectivement 7.8% et 3.6% pour les évènements reconstruits et les évènements sélectionnés.

Nous pouvons alors recalculer le pourcentage d'évènements reconstruits qui passent la coupure de sélection pour la simulation, en intégrant les évènements provenant de l'extérieur du module. Nous obtenons 47.8% au lieu de 49.9% obtenu précédemment, ce qui réduit la différence relative avec les données à -19%. L'évolution va dans le bon sens mais ne suffit pas à expliquer les différences observées.

Il semble néanmoins que la contamination des évènements mesurés par des évènements provenant de l'extérieur du module soit bien réelle. Ceci impliquerait notamment que l'accord entre les données et la simulation soit moins bon que ce que les premiers résultats indiquaient. Il pourra donc être utile pour les analyses finales d'étudier des méthodes permettant de couper ces évènements extérieurs. Cela pourrait par exemple être fait en utilisant les plans véto qui entourent le Module Proton.

Problèmes liés aux traces courtes

Nous avons, pour obtenir une acceptation plus importante du module due à une statistique faible au niveau des données, fixé un nombre de hits minimum assez faible pour les traces. C'est particulièrement le cas pour la deuxième trace, pour laquelle seuls deux hits sont exigés si cette trace est située près de l'extrémité d'une autre trace. Il se peut alors que l'algorithme de reconstruction reconstruise mal certaines traces ou même de fausses traces. Cela serait le cas par exemple si il y avait un hit de bruit proche de l'extrémité d'une trace reconstruite.

Pour estimer l'impact de ces erreurs potentielles, nous allons comparer les résultats avec les paramètres par défaut à ceux obtenus en demandant au moins 4 hits dans la seconde trace. Nous allons tracer dans les deux cas les distributions attendues d'après la simulation et mesurées dans les données du run 37 pour deux variables : l'angle d'ouverture et le produit mixte. Le produit mixte est une variable utilisée dans la partie deux pour la sélection des interactions, et qui a été retirée dans cette partie à cause d'un désaccord entre les données et la simulation. Elle mesure la coplanarité des particules : dans le cas d'une interaction CCQEL, si l'on néglige le recul du neutron et le mouvement de Fermi, les trajectoires du neutrino, du muon et du proton doivent être dans un même plan, ce n'est par contre pas le cas pour les interactions produisant plus de deux particules. Les résultats sont présentés sur la figure 16.9 pour le produit mixte et 16.10 pour l'angle d'ouverture.

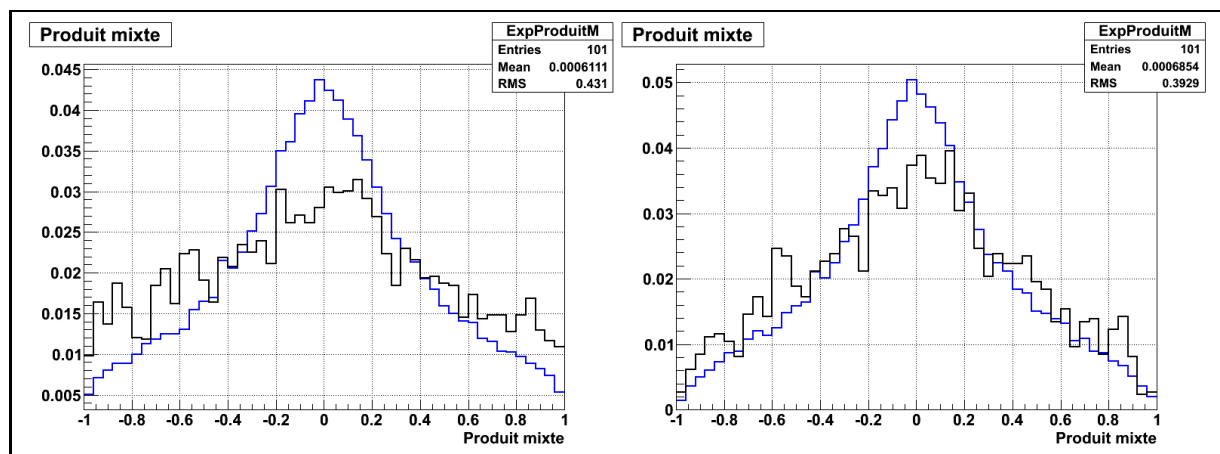


FIGURE 16.9 – Comparaison des distributions attendues (en bleu) et mesurées dans les données (en noir) pour le produit mixte. Le nombre de hits minimum par trace est de 2 pour la figure de gauche, et de 4 pour celle de droite.

L'accord entre les données et la simulation est meilleure lorsque l'on demande un minimum de 4 hits pour la seconde trace. C'est particulièrement le cas pour le produit mixte, qui semble de nouveau pouvoir être utilisé pour la sélection des événements si la seconde trace contient au moins 4 hits. Nous avons constaté lors de l'étude de l'acceptance que demander 4 hits réduisait fortement le nombre d'événements reconstruits. Nous ne disposons pas actuellement de suffisamment de données pour utiliser ce critère de sélection. Cependant, si l'intensité du faisceau continue à augmenter, il deviendra possible d'être plus sélectif, et d'utiliser cette variable supplémentaire pour la sélection des interactions, ce qui améliorerait son efficacité.

Concernant l'angle d'ouverture, l'accord est également meilleur si nous demandons un minimum de quatre hits pour la seconde trace. Il ne subsiste alors plus qu'un excès d'événements à fort angle dans les données. Ces événements sont peut-être ceux pour lesquels l'angle était mal reconstruit, qui constituait la queue de la distribution dans la figure 15.4.

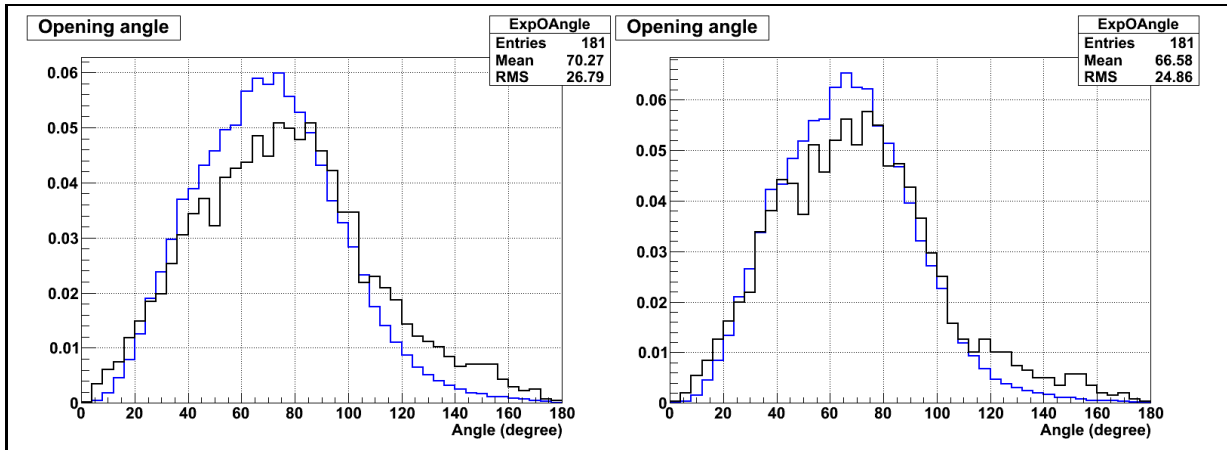


FIGURE 16.10 – Comparaison des distributions attendues (en bleu) et mesurées dans les données (en noir) pour l'angle d'ouverture. Le nombre de hits minimum par trace est de 2 pour la figure de gauche, et de 4 pour celle de droite.

16.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats préliminaires obtenus à partir des premières données du Module Proton. Ces résultats confirment le très bon fonctionnement du détecteur, et la possibilité de mesurer les interactions CCQEL. Ces résultats ne sont que préliminaires, et il subsiste un certain nombre de désaccords entre les données et la simulation. Plusieurs axes de travail sont envisagés pour améliorer les résultats :

- un travail sur la simulation, et notamment la simulation électronique du détecteur
- une meilleure étude des interactions se produisant à l'extérieur du module, pour réduire la contamination des données
- une coupure plus importante sur le nombre de hits minimum par trace qui sera possible lorsque nous disposerons de plus de données
- une amélioration de la reconstruction en elle-même

Une fois ces solutions mises en oeuvre, le Module Proton devrait permettre de mesurer le nombre d'interactions CCQEL sur l'axe du faisceau, en complément des détecteurs hors-axe du ND280 qui mesurent ce nombre dans la direction du détecteur lointain. Le module sera ensuite déplacé devant les autres modules horizontaux d'INGRID, ce qui permettra de mesurer comment ce nombre d'interactions varie lorsque l'on s'éloigne du centre du faisceau. Enfin d'autres études sont prévues à l'aide de ce module : il pourrait être utilisé pour calibrer les modules standards, et pour améliorer la détermination de la position du centre du faisceau.

Conclusion

Le phénomène d'oscillation quantique des neutrinos a permis de démontrer expérimentalement que les neutrinos possédaient une masse non nulle. Ce phénomène est décrit par une matrice de mélange dont tous les paramètres sauf un, l'angle de mélange θ_{13} ont pu être mesurés. Déterminer la valeur de ce dernier paramètre est l'objectif principal de l'expérience T2K, construite au Japon. Cette expérience utilise un faisceau de neutrinos muoniques produits par accélérateur, et cherche à détecter des neutrinos électroniques, apparus par oscillation, dans un détecteur lointain situé à 295 km du point de production des neutrinos à 2.5° de l'axe du faisceau.

L'expérience a commencé à fonctionner et à prendre des données en novembre 2009. Nous avons dans cette thèse étudié les premiers résultats au niveau du détecteur proche sur axe INGRID. Ce détecteur, constitué de plusieurs modules contenant du fer et des scintillateurs, permet d'étudier le faisceau de neutrinos sur l'axe, et notamment de mesurer la position de son centre. Nous avons vu au cours d'études sur la calibration de ce détecteur qu'il fonctionnait correctement et de manière stable dans le temps. Nous avons également pu mesurer un certain nombre de ses caractéristiques qui permettent un calcul des erreurs systématiques.

Nous avons étudié les caractéristiques du faisceau de neutrinos sur la première période de prise de données, le run 2010a. Nous avons ainsi pu vérifier que ce faisceau avait bien le profil attendu dans le plan transverse, et que le détecteur INGRID pouvait remplir son rôle principal pour les analyses d'oscillation : la détermination de l'angle hors-axe, avec une précision d'un milliradian. Les études sur le profil (x,y) du faisceau et le nombre d'événements attendus permettront ultérieurement d'améliorer la simulation JNU-BEAM du faisceau de neutrinos développée par le groupe de travail "faisceau". De ce point de vue, un léger excès d'événements, de l'ordre de 5%, est observé dans les données par rapport aux simulations, de façon stable dans le temps. Cet excès pourrait diminuer au fur et à mesure que la simulation du faisceau s'améliore grâce à nos résultats et à ceux de l'expérience NA61 qui mesure les particules produites par collisions de protons sur une cible de carbone identique à celle utilisée dans T2K.

Le second sujet de cette thèse concerne un nouveau détecteur : le Module Proton. Nous avons décrit la conception, l'installation et les premiers résultats de ce module, première amélioration de l'expérience T2K, placé entre les modules standards du détecteur INGRID. Il a pour vocation de mesurer les interactions CCQEL se produisant sur l'axe du faisceau, en détectant aussi le proton de recul : cette particule est rapidement arrêtée dans les modules standards d'INGRID à cause de la présence du fer. Le Module Proton n'est lui composé que de scintillateurs, ce qui permet au proton de parcourir une distance suffisante pour être détecté.

L'étude de ce module est séparée en deux parties : tout d'abord sa conception, avec une optimisation de la géométrie et le développement d'une méthode de reconstruction des événements, utilisant la transformation de Hough, pour détecter les événements CCQEL. Nous avons ensuite montré que ce module pouvait être utilisé pour mesurer spécifiquement le nombre d'interactions CCQEL à l'aide d'une méthode de vraisemblance. Sur la base de ces études, le Module Proton fut accepté par la collaboration. Sa construction et son installation eurent lieu à la fin du run 2010a, pendant l'été 2010. Il put ensuite être utilisé pour la seconde période de prise de données, le run 2010b.

L'étude de ces données constitue la deuxième partie consacrée au Module Proton. Nous avons développé un nouvel algorithme de reconstruction des événements pour combler les lacunes de l'algorithme utilisé pour les études de conception du module, et cherché à comparer les résultats mesurés avec les données à ce qui était attendu par simulation. Nous avons constaté que le module pouvait séparer les interactions

CCQEL des autres à l'aide de la méthode de vraisemblance. Cependant, certaines différences entre les données et la simulation subsistent. Plusieurs axes de travail sont suggérés pour corriger ces problèmes dus au caractère préliminaire de notre étude. Il ne fait aucun doute que le Module Proton doit pouvoir fournir un résultat précis concernant le nombre d'interactions CCQEL se produisant sur l'axe du faisceau pour une période de prise de données.

L'expérience T2K a suivi au cours des deux dernières années une montée en puissance, notamment au niveau de l'intensité du faisceau. Les opérations ont malheureusement dû être interrompues à cause du tremblement de terre ayant frappé le Japon le 11 mars 2011, mais devraient reprendre à la fin de cette année. La luminosité totale intégrée enregistrée au 11 mars correspond à 1.46×10^{20} POT. Le bon fonctionnement des différentes parties de l'expérience observé pendant les premières prises de données permet d'espérer des résultats sur la mesure de θ_{13} prochainement. Ensuite, l'expérience pourra dans une deuxième phase étudier l'autre question ouverte concernant le phénomène d'oscillation quantique des neutrinos : une éventuelle asymétrie entre matière et antimatière qui traduirait une violation de la symétrie CP dans le secteur leptonique du modèle standard. Cette étude pourra être réalisée en transformant le faisceau de neutrinos en faisceau d'antineutrinos et en comparant les résultats obtenus.