

Le détecteur lointain : Super-Kamiokande

7.1 Introduction

Le détecteur Super-Kamiokande (SK), qui sert de détecteur lointain dans l'expérience T2K, est un détecteur qui existait déjà avant l'expérience, et poursuit également d'autres programmes de recherche indépendants de T2K. Il a déjà servi de détecteur lointain pour une autre expérience d'oscillations de neutrinos avec accélérateur, l'expérience (sur axe) K2K, son utilisation en tant que détecteur lointain a donc déjà été bien étudiée.

Super-Kamiokande est un détecteur de deuxième génération construit dans la mine de Kamioka, préfecture de Gifu au Japon. Son prédécesseur, le détecteur KamiokaNDE (Kamioka Nuclear Decay Experiment), avait été conçu pour détecter la désintégration du proton, prédite par des modèles de grande unification. Il n'a pas pu détecter cette réaction, mais s'est révélé être un très bon détecteur pour les neutrinos, ceux de supernovae en particulier. Pour augmenter la statistique, un nouveau détecteur, Super-Kamiokande, fut conçu sur le même principe mais avec des dimensions plus grandes, et mis en service en 1996.

Super-Kamiokande a apporté la preuve de l'oscillation des neutrinos atmosphériques en 1998, en comparant les flux de neutrinos arrivant au détecteur depuis des directions opposées.

Un accident survenu en novembre 2001 a provoqué la destruction d'une grande partie des phototubes utilisés pour la détection, mais le détecteur a depuis été complètement remis en état.

En plus de T2K, Super-Kamiokande poursuit un vaste programme de recherche : oscillations des neutrinos solaires et atmosphériques, désintégration du proton, étude des supernovae par l'intermédiaire des neutrinos qu'elles produisent.

7.2 Caractéristiques du détecteur

Description du détecteur

Super-Kamiokande est un détecteur Cerenkov à eau. La cible, dans laquelle les neutrinos vont interagir est donc de l'eau purifiée (masse totale 50 kilotonnes, volume fiduciel de 22.5 kilotonnes). Le détecteur a la forme d'un cylindre, de 39 mètres de diamètre et 42 mètres de haut. Il est divisé entre un détecteur intérieur et un détecteur extérieur (figure 7.1). Le détecteur intérieur contient 32 kilotonnes d'eau, et le détecteur extérieur est constitué par une épaisseur d'environ 2.5 mètres d'eau autour du détecteur intérieur.

La détection utilise l'effet Cerenkov : lorsqu'une particule chargée traverse un isolant diélectrique avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans ce milieu, elle provoque l'émission d'un cône de lumière. C'est cette lumière qui est détectée pour identifier les particules et leurs propriétés.

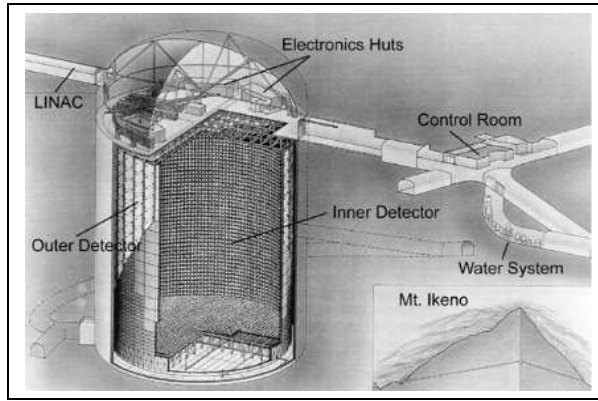


FIGURE 7.1 – Organisation du détecteur Super-Kamiokande

Pour la détection de la lumière, SK utilise des Photo-Multiplier Tubes (PMT). Le détecteur intérieur (ID) en comporte 11146 (Hamamatsu Type R3600) de 50 centimètres de diamètre. Le détecteur extérieur (OD) en comporte 1885 de 20 centimètres de diamètre.

Le détecteur étant situé dans une ancienne mine, il est isolé par une couche de plus d'un kilomètre de roches (équivalent à 2700 mètres d'eau), ce qui réduit significativement le bruit de fond cosmique. Seuls les muons cosmiques d'énergie supérieure à 1.3 TeV peuvent atteindre le détecteur.

Classification des événements

Les événements sont classés selon différents types, en fonction de l'endroit où l'on détecte de l'énergie :

- complètement contenus (FC) : événements produits dans le détecteur intérieur, sans activité détectée dans le détecteur extérieur.
- partiellement contenus (PC) : ces événements sont également produits dans le détecteur intérieur, mais l'on détecte en même temps dans le détecteur extérieur un signal compatible avec une particule qui s'échappe du détecteur.
- muons allant vers le haut : ces événements correspondent à des muons produits par interaction de neutrinos dans la roche située sous le détecteur. Ils sont classifiés en muons traversant le détecteur, et muons s'arrêtant dans le détecteur.

Les événements complètement contenus sont ensuite classés selon qu'un ou plusieurs anneaux Cerenkov ont été détectés, et selon qu'ils sont de type électrons ou muons. En effet SK permet une bonne séparation entre les événements provenant de ν_μ et de ν_e , point qui sera critique pour la recherche de l'apparition des ν_e par T2K. Par contre les photons donnent également un signal de type électron. Cela peut être un problème dans le cas de la désintégration d'un π^0 en deux photons, si l'un seulement des deux photons est détecté, ou si les deux photons partent pratiquement dans la même direction et sont détectés comme un seul anneau. Pour cette raison, la production de π^0 est l'un des bruits de fond principaux pour l'apparition des ν_e dans T2K.

7.3 Utilisation dans T2K

Super-Kamiokande sera utilisé comme détecteur lointain dans l'expérience T2K, tout en continuant ses propres expériences. Cela est possible grâce à la structure pulsée du faisceau de neutrinos. La fenêtre de temps à laquelle les neutrinos doivent arriver est déterminée à l'aide d'une synchronisation par GPS entre J-PARC et SK. Une telle synchronisation a déjà été utilisée dans l'expérience K2K, qui a montré que cette méthode permettait une synchronisation avec une erreur inférieure à 200 ns. On obtient ainsi un rapport entre le nombre d'événements provenant du faisceau et le nombre d'événements provenant de

neutrinos cosmiques pendant le temps d'acquisition dédié à T2K de l'ordre de 10^7 .

Troisième partie

Conception du Module Proton

Chapitre 8

Fabrication du détecteur

8.1 Motivations et objectifs

Le Module Proton (MP) doit servir à caractériser plus précisément le faisceau en étudiant les interactions CCQEL produites par les neutrinos muons incidents. Dans une telle interaction, deux particules chargées, et seulement deux, sont produites : un proton et un muon. Dans les modules standards d'INGRID les blocs de fer arrêtent rapidement le proton. Seule la trace du muon peut alors être reconstruite. Une interaction CCQEL correspond à l'équation :

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu + p$$

Nous souhaitons pouvoir reconstruire également la trace du proton avec le Module Proton. Pour cela, nous allons construire un module sur le même principe que les autres modules, mais sans cibles de fer. La distance parcourue par les protons dans le module va alors augmenter suffisamment pour qu'une trace puisse être reconstruite.

Si nous parvenons à reconstruire les traces des deux particules chargées, nous pourrions étudier plus précisément la topologie de l'évènement et ainsi essayer de séparer les interactions CCQEL des autres interactions se produisant dans le module. Ces interactions sont mieux connues que les autres, notamment au niveau de la section efficace d'interaction.

Ce module sera placé devant les modules horizontaux d'INGRID. Nous utiliserons pour la reconstruction des évènements à la fois ce module et les modules horizontaux situés derrière. Le module étant plus léger, il pourra être déplacé pour être placé devant différents modules horizontaux. Cela nous permettra de faire de la calibration, en comparant le ratio (nombre d'évènements reconstruits dans le Module Proton)/(nombre d'évènements reconstruits dans le module horizontal situé derrière) pour les différents modules horizontaux.

8.2 Géométrie

La première phase de la conception consiste à définir une géométrie pour le détecteur. Dans cette partie, seule la partie active du détecteur est considérée.

Ces études ont été réalisées avec le premier Monte-Carlo utilisé pour INGRID, et une méthode de reconstruction des évènements présentée dans le chapitre 5. Depuis, un nouveau Monte Carlo, plus précis, a été réalisé, et la méthode de reconstruction a été améliorée. Les résultats sont donnés ici tels qu'ils ont été obtenus à l'époque de la conception du module, et non pas avec les nouveaux outils plus précis conçus ultérieurement pour l'analyse des données en partie 5.

L'organisation générale du détecteur est similaire à celle d'un module ordinaire d'INGRID, avec une alternance de plans de scintillateurs donnant une information sur la position des hits sur l'axe X ou Y,

séparés par de l'air (il n'y a plus de plaques de fer dans ce module). Il faut préciser que les scintillateurs horizontaux donnent une information sur la position sur l'axe Y, alors que les scintillateurs verticaux donnent une information sur la position sur l'axe X. Une vue d'ensemble du détecteur est présentée sur la figure 8.1.

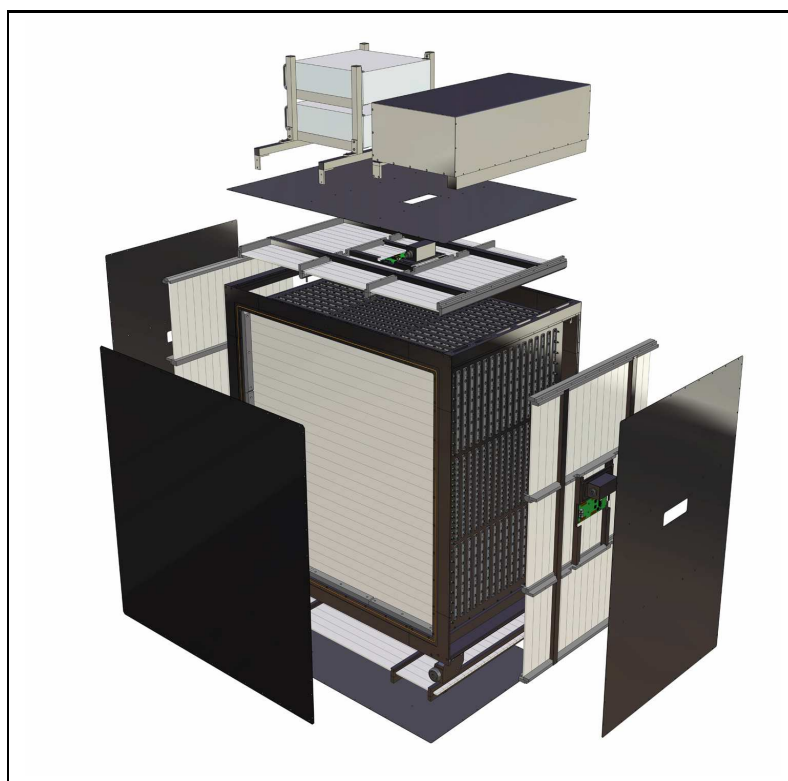


FIGURE 8.1 – Vue éclatée du Module Proton.

Contraintes et conséquences

Matériaux disponibles

Le Module Proton va être construit à partir des différentes pièces disponibles après la construction des autres modules d'INGRID. Certaines pièces supplémentaires pourront être achetées, mais cela n'inclut ni les scintillateurs ni les MPPC. Le nombre maximum de voies et les scintillateurs que l'on peut utiliser pour ce module sont donc fixés par les réserves disponibles. Il faut également conserver parmi ces pièces des réserves pour les réparations d'INGRID. Le tableau 8.1 résume les pièces disponibles après une première estimation.

Le nombre de scintillateurs standards (ceux utilisés pour les autres modules d'INGRID) disponible est de l'ordre du nombre de voies d'un module standard d'INGRID. On souhaiterait pour le MP avoir plus de voies, pour permettre une reconstruction des événements plus précise, et avoir le plus d'événements possible. D'autres scintillateurs ("minces" dans le tableau 8.1) sont disponibles à l'université de Kyoto, ce qui permet de doubler le nombre de voies en combinant ces deux types de scintillateurs au sein des plans de tracking. Il y a en revanche suffisamment de scintillateurs de type veto long et veto court pour construire les plans véto du Module Proton.

Scintillateurs				
Désignation	largeur	longueur	épaisseur	Nombre disponible
Standard	5 cm	120.3 cm	1 cm	600
Véto court	5cm	111.9 cm	1 cm	100
Véto long	5 cm	129.9 cm	1cm	100
Minces	2.5 cm	120 cm	1.3 cm	600
MPPC	1774			

TABLE 8.1 – Matériels disponibles pour le Module Proton

Place disponible

Le Module Proton sera placé devant les modules horizontaux, à l'étage -2. La place disponible devant ces modules est relativement limitée, de l'ordre du mètre. Un plan de l'espace libre pour le Module Proton est présenté en figure 8.2.

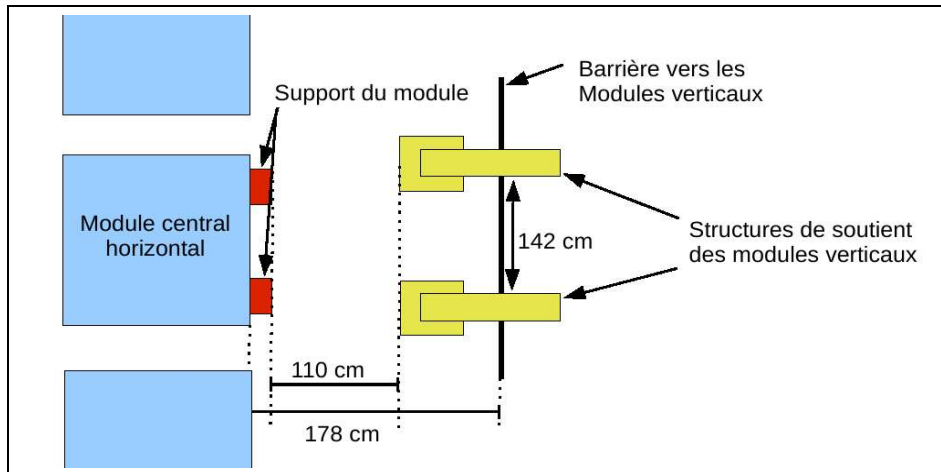


FIGURE 8.2 – Place disponible pour le module (vue de dessus).

L'idée est de placer le module entre le module H03 (le module au centre des modules horizontaux) et les supports de la tour verticale (en jaune sur la figure). Cela laisse donc un peu plus d'un mètre. Il faut prévoir également de garder de la place pour la structure mécanique du module, qui allongera nécessairement ce dernier, ainsi qu'un espace entre les deux modules, fixé à 10 cm pour l'instant. A titre de comparaison, un module INGRID standard a une longueur totale de 107 cm. Il faut donc construire un module plus compact.

Nous aurions également pu envisager de placer le module entre les deux structures de support jaunes pour avoir un module plus long, mais cela aurait posé des problèmes pour le déplacer ultérieurement, ainsi qu'obstrué le passage autour des modules horizontaux.

Etude des géométries

Critère d'évaluation des performances

Nous allons dans cette partie étudier les performances de différentes géométries et l'impact de différents paramètres sur les performances du détecteur MP. Il nous faut donc un critère permettant de

les évaluer. Nous allons utiliser pour cela la reconstruction de l'angle d'ouverture, c'est à dire de l'angle entre la trajectoire du muon et celle du proton (en se restreignant ici aux évènements CCQEL). La bonne reconstruction de cet angle nécessite la bonne reconstruction des traces des deux particules, ce qui en fait un bon critère d'évaluation.

Nous allons regarder la distribution de la différence entre l'angle reconstruit et l'angle véritable (simulé par Monte Carlo). Les grandeurs que nous allons mesurer sur cette distribution sont :

- RMS : il s'agit de la dispersion de la distribution, calculée en prenant la racine des écarts à la valeur moyenne élevés au carré
- sigma : il s'agit de l'écart type obtenu par ajustement d'une fonction gaussienne sur cette distribution.

Placement des scintillateurs

Comme expliqué dans la partie précédente, il y aura dans les plans de tracking du MP deux types de scintillateurs : des scintillateurs standards de 5 cm de large, et des scintillateurs plus minces de 2.5 cm de large. Les scintillateurs minces donnent une information plus précise sur la position des hits et étant plus épais ils ont probablement une meilleure efficacité de détection. Nous allons chercher à les placer là où l'efficacité des plans est maximale. L'idée est ici de construire des plans de tracking tous identiques, chaque plan comportera donc les deux types de scintillateurs. Il faut donc déterminer où placer les scintillateurs les plus précis dans un plan. Pour cela, nous pouvons mesurer l'efficacité de reconstruction des évènements dans un module standard d'INGRID avec des scintillateurs standards de 5 cm de large, en fonction de la position en x et y du vertex.

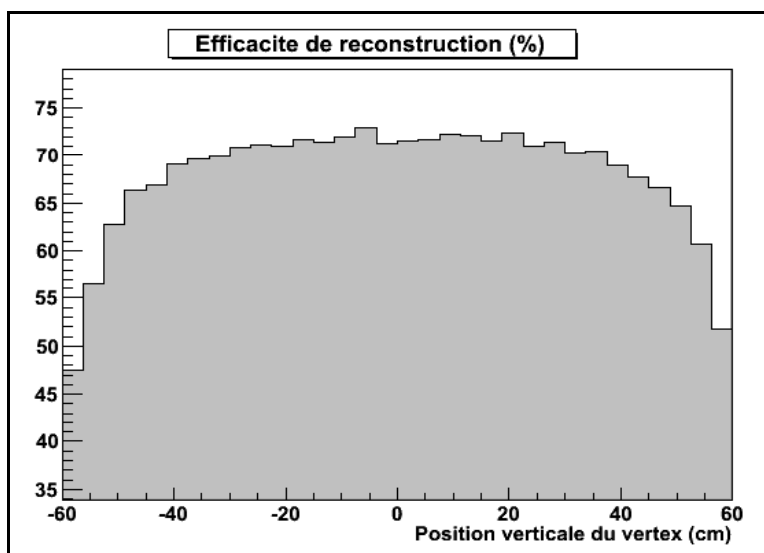


FIGURE 8.3 – Efficacité de reconstruction dans un module standard d'INGRID en fonction de la position du vertex dans un plan de tracking

Il apparaît sur la figure 8.3 que l'efficacité de reconstruction est maximale au centre d'un plan et diminue lorsque l'on se rapproche des bords. Cela s'explique par la façon dont est faite la reconstruction : il faut pour qu'un évènement soit reconstruit qu'il y ait des hits sur au moins 3 plans. Plus le vertex est situé au bord du module, plus la probabilité que la particule sorte du module avant d'avoir traversé trois plans augmente.

Nous allons donc placer les scintillateurs minces (les plus précis) au centre du module, et les scintillateurs standards sur les bords. Cela semble a posteriori un bon choix : en effet les interactions se produisant à l'extérieur des modules étant une source de bruit importante pour les modules standards d'INGRID, il a fallu définir un volume fiduciel excluant les interactions se produisant sur les bords des modules. En

plaçant les scintillateurs minces au centre du module, ils se retrouvent à l'intérieur du volume fiduciel.

Plans de scintillateurs

Il reste maintenant à déterminer le nombre de scintillateurs de chaque type utilisé dans un plan. Comme le Module Proton va être utilisé en conjonction avec un module standard situé derrière lui, il est préférable que les plans de tracking aient la même dimension que les plans standards (120 cm × 120 cm).

Le nombre de scintillateurs détermine le nombre de voies électroniques d'un plan. Ces voies sont reliées à des cartes électroniques pouvant traiter chacune 64 voies. Pour des raisons de construction mécanique, il est préférable de pouvoir placer deux plans par carte électronique, ce qui donne 32 scintillateurs par plan. Une répartition de 16 scintillateurs standards et 16 scintillateurs mince permet de vérifier ces deux conditions. Il a donc été décidé de placer les 16 scintillateurs minces au centre du module, et 8 scintillateurs standards sur chaque bord, l'organisation d'un plan obtenue est présentée en figure 8.4.

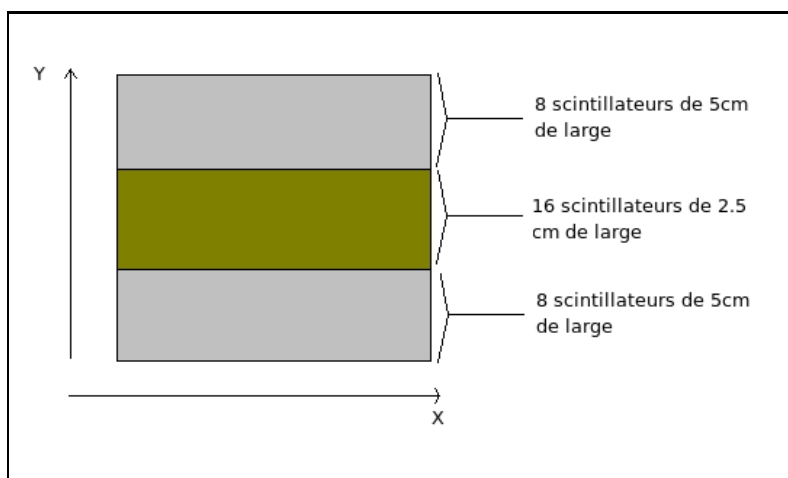


FIGURE 8.4 – Vue de face d'un plan de tracking vertical

Néanmoins les scintillateurs minces devraient donner une meilleure précision. Il faut donc s'assurer que cette configuration ne diminue pas la précision. Pour cela, nous pouvons comparer cette configuration à une autre configuration qui serait constituée de 14 scintillateurs standards et de 20 minces, les scintillateurs minces étant toujours placés au centre du plan. Cette configuration utilise le maximum de scintillateurs minces disponibles, si le module comporte 16 couples de plans de tracking. Les résultats sont présentés dans le tableau 8.2. La définition de l'acceptance est détaillée dans le paragraphe 'efficacité de la géométrie'. La méthode de reconstruction utilisée est quant à elle détaillée dans le chapitre suivant.

Ces résultats montrent que le seul effet notable est une amélioration de l'efficacité de reconstruction. Il est surprenant que la précision ne soit pas améliorée. Cela provient peut-être de la méthode de reconstruction utilisée ; néanmoins les tentatives de modification du code entreprises n'ont pas permis d'améliorer les performances de la configuration à 20 scintillateurs de type SciBar par rapport à la configuration de référence. Au vu de ces résultats, il a été décidé de conserver une configuration utilisant 16 scintillateurs minces par plan de tracking.

Nombre de plans de scintillateurs

Maintenant que la géométrie d'un plan de "tracking" est fixée, il reste à déterminer le nombre de plans total pour ce module. Ce nombre est doublement important. Tout d'abord, il n'y a pas de cibles de fer dans ce module. Toutes les interactions auront donc lieu dans les plans de scintillateurs, ce qui implique

Paramètre	16 scintillateurs	20 scintillateurs
Acceptance(%)	59.68	59.72
Efficacité de reconstruction(%)	80.7	81.51
Sigma de l'erreur sur la reconstruction de l'angle	3.98°	3.87°
RMS de l'erreur sur la reconstruction de l'angle	18.25°	19.08°
Sigma de l'erreur sur la reconstruction de l'angle après sélection des événements	3.64°	3.62°
RMS de l'erreur sur la reconstruction de l'angle après sélection des événements	9.36 °	9.39 °

TABLE 8.2 – Influence du nombre de scintillateurs minces

que chaque plan supplémentaire augmente le nombre d'événements ayant lieu dans le Module Proton. Ensuite, une augmentation du nombre de plans augmente également le nombre de hits potentiels pour un événement, ce qui devrait permettre de mieux le reconstruire.

En revanche, le nombre de voies augmente avec le nombre de plan (64 voies pour un couple de plans horizontaux et verticaux), sachant que ce nombre de voies est limité par le nombre de MPPC disponibles. De plus chaque plan supplémentaire augmente la longueur totale du module, limitée par la place disponible dans le puits pour placer le module.

Nous allons comparer des configurations avec différents nombres de plans, respectivement 14, 16 et 18 (sans compter le plan veto avant, seuls sont considérés ici les plans de tracking à proprement parler). Les résultats sont indiqués dans le tableau 8.3.

Paramètre	14 plans	16 plans	18 plans
Longueur du module (cm)	58	66	74
Acceptance(%)	59.39	59.68	60.02
Efficacité de reconstruction(%)	80.21	80.7	81.83
Sigma de l'erreur sur la reconstruction de l'angle	4.11°	3.98°	3.91°
RMS de l'erreur sur la reconstruction de l'angle	18.4°	18.25°	18.61°
Sigma de l'erreur sur la reconstruction de l'angle après sélection des événements	3.81°	3.64°	3.59°
RMS de l'erreur sur la reconstruction de l'angle après sélection des événements	9.53 °	9.36 °	9.32°

TABLE 8.3 – Comparaison entre des configurations ayant un nombre de plans différents

Ce tableau montre que l'augmentation du nombre de plans de scintillateurs augmente l'acceptance du détecteur, ainsi que l'efficacité de reconstruction. Cela augmente donc la statistique. Comme mentionné précédemment cela augmente également la quantité de matière dans laquelle les neutrinos peuvent interagir, et au final nous obtenons ainsi une amélioration significative de la statistique.

Au niveau de la qualité de la reconstruction, il semble y avoir une légère amélioration de la précision

sur la reconstruction de l'angle d'ouverture. Néanmoins l'effet est assez faible. Comme nous disposons de suffisamment de scintillateurs et de place dans le puit pour construire la configuration à 18 plans, il a été décidé de garder cette configuration. Il y aura donc 18 plans de tracking et un plan veto frontal.

Espacement entre les plans

Les plans de tracking sont régulièrement espacés, de l'air les séparant. Nous allons étudier ici l'impact de la distance entre deux plans successifs sur les performances du détecteur. Pour cela différentes configurations avec un espacement variant de 0.7 cm (cet écartement est celui utilisé pour les études précédentes) à 1.7 cm sont comparées. La place disponible pour le module étant limitée, nous n'allons utiliser un espacement plus grand que si cela améliore les performances. Cette étude a été effectuée en utilisant une géométrie à 16 plans de tracking. Les résultats sont présentés dans le tableau 8.4. La sélection des événements est expliquée dans la partie reconstruction (partie suivante) : une méthode de vraisemblance sert à déterminer si un événement est bien reconstruit ou non.

Espacement	7mm	10mm	12mm	14mm	17mm
Longueur du module (cm)	66	75.6	82	88.4	98
Acceptance(%)	59.68	58.4	57.5	56.54	55.15
Efficacité de reconstruction(%)	80.7	81.63	80.72	80.08	79.13
Avant sélection des événements					
Erreur sur l'angle d'ouverture (RMS)	18.25°	18.03°	17.88°	17.18°	17.5°
Erreur sur l'angle d'ouverture (sigma)	3.98°	4.01 °	3.75°	3.88°	3.81°
Nombres d'évènements conservés	19818	19630	19222	18796	18208
Après sélection des événements					
Erreur sur l'angle d'ouverture (RMS)	9.36 °	9.26 °	8.68°	8.45°	8.21°
Erreur sur l'angle d'ouverture (sigma)	3.64°	3.55°	3.48°	3.43°	3.48°
Nombres d'évènements conservés	16796	16794	16497	16251	15557

TABLE 8.4 – Influence de l'espacement entre deux plans successifs sur les performances du module

Il apparaît que lorsque l'espacement entre deux plans successifs augmente, l'acceptance diminue. Cela s'explique assez facilement : pour pouvoir reconstruire la trace d'une particule, il faut qu'elle ait laissé des hits sur au moins 3 plans différents du module. Si la distance entre les plans augmente, la probabilité que la particule sorte latéralement du module avant d'avoir traversé trois plans augmente également, et donc l'acceptance diminue.

Nous pouvons cependant remarquer que la précision de la reconstruction de l'angle d'ouverture s'améliore lorsque l'espacement augmente. Pour cette raison, il a été décidé de garder un espacement un peu supérieur à l'espacement initial. Il n'est en effet pas possible de trop l'augmenter tout en conservant 18 plans de tracking, au vu de la place disponible dans le puit. L'espacement a finalement été fixé à 1 cm.

Plans décalés

Une des caractéristiques d'INGRID est d'utiliser des scintillateurs larges (5cm) et donc d'avoir une granularité relativement élevée, justifiée par la présence des plaques de fer qui entraînent une diffusion des particules. Pour tenter d'améliorer cela, nous allons essayer de décaler un plan sur deux de la moitié d'un

scintillateur, comme schématisé sur la figure 8.5.

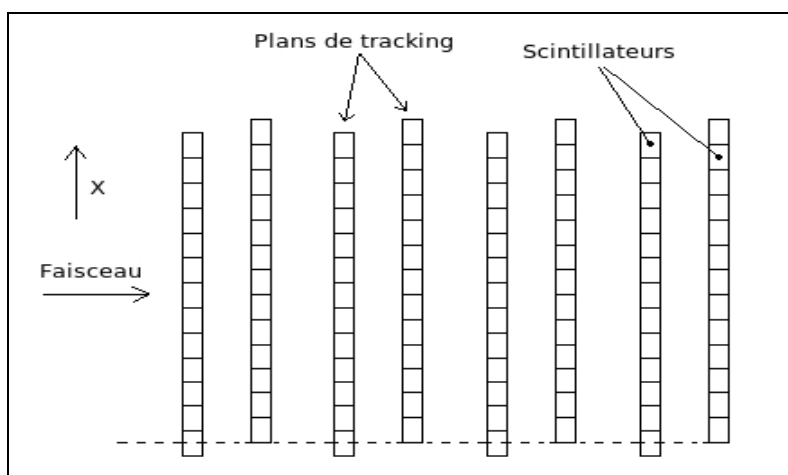


FIGURE 8.5 – Configuration décalée

Cette méthode a été testée avant l'utilisation des scintillateurs minces, donc uniquement sur des plans constitués de 24 scintillateurs de 5 cm de large. Nous voulions savoir si cette méthode améliorerait la précision de la reconstruction en comparant la proportion d'évènements reconstruits, la précision de la reconstruction du vertex et de l'angle entre le proton et le muon. Les résultats sont indiqués dans le tableau 8.5.

Paramètre	Configuration normale	Configuration décalée
Evènements reconstruits(%)	83.7	83.5
Coordonnée z du vertex reconstruite à 1.5cm près (%)	86.48	86.1
Sigma de l'erreur sur la reconstruction de l'angle	3.31°	3.42°

TABLE 8.5 – Comparaison configurations normale et décalée

Ce changement de configuration ne semble pas améliorer les performances. Comme la configuration décalée est probablement plus compliquée à construire d'un point de vue mécanique, il a été décidé de ne pas conserver cette modification.

Géométrie finale

Plans vétos

Pour filtrer les évènements ne provenant pas d'interactions à l'intérieur du module, le module sera entouré de 4 plans vétos, de la même façon que pour un module standard. De plus, pour filtrer les évènements provenant d'interactions en amont du Module Proton, le premier plan de tracking sera utilisé comme un plan veto. Il sera uniquement constitué de scintillateurs standards (5 cm de large). Ce premier plan sera similaire à un plan de tracking d'un module standard. En particulier il y aura un plan de scintillateurs horizontaux, et un plan de scintillateurs verticaux, contrairement aux autres plans vétos, qui ne comportent que l'un des deux. Cela permet une meilleure détection des particules provenant de l'extérieur par la face avant du module. Cette sécurité supplémentaire est nécessaire pour filtrer les muons produits par des neutrinos du faisceau dans la structure en béton du puit. En effet, l'étude des premiers résultats des modules

standards d'INGRID a montré qu'il s'agissait de la principale source de bruit dans les données du faisceau.

Arrangement des plans dans le module

Dans un module standard, les plans de tracking sont regroupés par deux : un plan horizontal et un plan vertical collés ensemble. Ici, deux types de scintillateurs ayant des épaisseurs différentes sont utilisés : les scintillateurs standards ont une épaisseur de 1cm, alors que les scintillateurs minces ont une épaisseur de 1.3 cm. Il devient donc plus difficile de coller ensemble deux plans de scintillateurs de façon à ce que les centres de tous les scintillateurs aient la même coordonnée z (ce qui est préférable pour la reconstruction).

La solution retenue est d'espacer régulièrement tous les plans de tracking. Nous procéderons de la même façon pour le premier plan (vêto avant), même si pour ce plan il aurait été possible de coller les scintillateurs horizontaux et verticaux ensemble. Cette solution semble également préférable pour la conception mécanique.

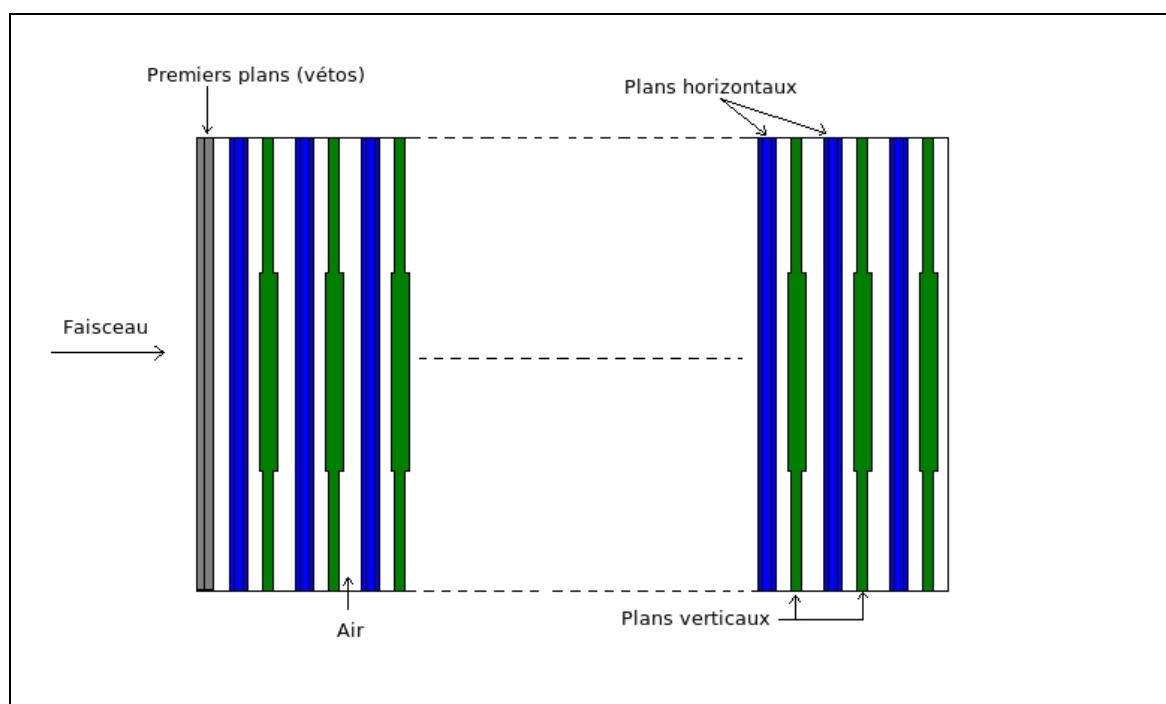


FIGURE 8.6 – Organisation schématique du module (vue de dessus)

Description de la géométrie finale

Le module est organisé de la façon suivante :

- un premier couple de plans qui sera utilisé comme vêto pour les interactions se produisant en amont du module. Il n'est constitué que de scintillateurs de 5cm de large, mais contrairement à un module standard d'INGRID, les deux plans ne sont pas collés l'un contre l'autre, mais séparés par de l'air.
- une alternance de plans de tracking horizontaux et verticaux, régulièrement espacés et séparés par de l'air. L'enchaînement commence par un plan horizontal, puis un plan vertical, et ainsi de suite. Il y a au total 18 plans horizontaux et 18 plans verticaux. Ces plans sont constitués de 16 scintillateurs de 2.5 cm au centre et de 8 scintillateurs de 5 cm sur chaque bord, pour un total de 32 voies par plan.
- 4 plans vétos entourants le module, sur le même principe que pour un module standard.

L'espacement entre deux plans de scintillateurs successifs est de 1 cm d'air. L'épaisseur d'un scintillateur est de 1.3 cm, donc le pas entre deux plans successifs est de 2.3 cm, et le pas entre deux scintillateurs de même orientation (horizontale ou verticale) est de 4.6 cm. La longueur totale du module est alors de 84.8 cm. Cette longueur ne prend en compte que les scintillateurs, il faudra encore ajouter la structure mécanique du module. Les pièces nécessaires pour réaliser ce module sont résumées dans le tableau 8.6.

Désignation	Quantité utilisée
Scintillateurs standards	624
Scintillateurs minces	576
MPPC (voies)	1200

TABLE 8.6 – Pièces utilisées pour le Module Proton

Efficacité géométrique

Pour une première évaluation de l'efficacité du MP, parfois appelée acceptance du détecteur, nous allons mesurer la proportion d'évènements qui peuvent être reconstruits. Nous voulons avec le Module Proton reconstruire une trace pour le proton et une trace pour le muon. Nous allons mesurer deux acceptances : le cas où l'on peut reconstruire une trace (par comparaison avec un module standard), et le cas où l'on peut reconstruire les deux traces. Les critères suivants sont utilisés pour l'acceptance :

- la première trace peut être reconstruite si le muon ou le proton a laissé des hits sur au moins 3 TKP différents sur le plan horizontal et sur le plan vertical
- la seconde trace peut être reconstruite si le muon a laissé des hits sur au moins 3 TKP différents, et le proton sur au moins 2 TKP différents, sur le plan horizontal et sur le plan vertical

Les résultats sont résumés dans le tableau 8.7.

	Acceptance (%)
Première trace	98.08
Deuxième trace	63.78

TABLE 8.7 – Acceptance par trace du Module Proton pour les évènements CCQEL

Ces résultats seront complétés par l'efficacité de reconstruction, dans la partie "tracking". L'ensemble permettra d'évaluer l'efficacité du module. Un évènement CCQEL est considéré comme reconstruit si les deux traces le sont, ce qui signifie que l'acceptance du module pour ces évènements est de 63.78%.

8.3 Aspects mécaniques

Le LLR était entre autre responsable de la conception mécanique du module, à partir des spécifications présentées ci-dessus. Cette conception mécanique a été réalisée par le département mécanique du LLR, sous la responsabilité d'Oscar Ferreira. Le module conçu part de la géométrie décrite précédemment. Les schémas montrés dans cette partie ont également été réalisés par Oscar Ferreira.

Modifications apportées par rapport à la géométrie souhaitée

Un comptage précis des scintillateurs disponibles pour construire le Module Proton a révélé que les chiffres utilisés pour l'études précédente n'étaient en fait qu'une estimation rapide. Les scintillateurs réel-

lement disponibles sont comptabilisés dans le tableau 8.8.

Désignation	Quantité nécessaire	Quantité disponible
Scintillateurs standards	624	634
Scintillateurs minces	576	566

TABLE 8.8 – Scintillateurs réellement disponibles pour le Module Proton

Il n’y a donc pas suffisamment de scintillateurs minces pour réaliser la géométrie souhaitée. Le groupe de Kyoto a essayé de résoudre le problème en collant des bouts de scintillateurs minces pour obtenir d’avantages de scintillateurs de ce type. Malheureusement, la qualité des scintillateurs ainsi obtenus n’était pas suffisante.

Il a donc été décidé de réduire le nombre de plans de tracking effectivement présents dans le module. Le module comportera donc finalement 17 plans de tracking seulement, et non 18. Une autre modification est que l’espace entre les deux plans véto initiaux et le premier plan de tracking est un peu supérieur à l’espacement entre deux plans de tracking (4 mm supplémentaires). L’organisation exacte des plans de tracking dans le module est montré dans la figure 8.7 (par Oscar Ferreira).

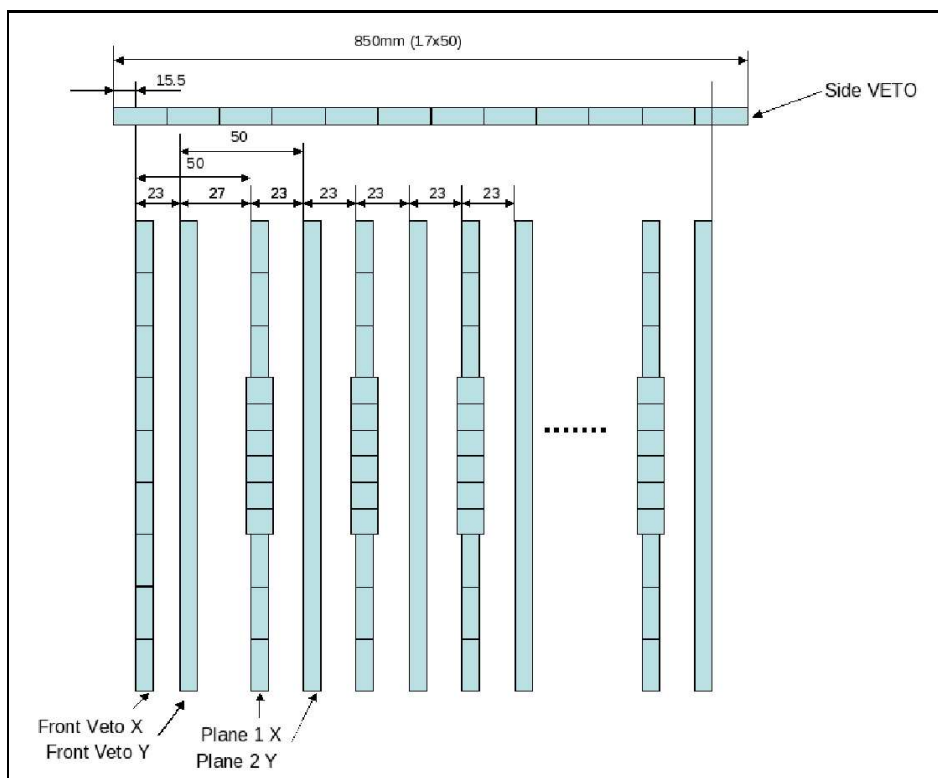


FIGURE 8.7 – Structure des scintillateurs dans le Module Proton (vue de profil).

Concept général

Contrairement aux modules standards d’INGRID pour lesquels chaque plan de tracking constituait une structure à part entière insérée dans le module, le Module Proton est constitué d’un seul bloc. La structure mécanique est constituée d’une cage en aluminium, dans laquelle des rainures sont découpées pour insérer les scintillateurs. Le centre du module n’est donc constitué que de scintillateurs et d’air. Autour de cette structure principale sont situés 4 plans véto. Ces plans sont des structures autonomes, contenant chacun

17 scintillateurs et leur carte électronique (sauf pour le plan veto du bas, dont les scintillateurs sont reliés à la carte électronique du plan veto gauche).

L'ensemble est fermé par des plaques d'aluminium pour assurer l'isolation lumineuse de l'intérieur du module. Enfin, les cartes électroniques pour les plans de tracking sont situées dans un coffret séparé, placé sur le dessus du module (figure 8.1).

Plans de tracking

Comme expliqué précédemment, le module comporte 17 plans de tracking. Chacun de ces plans est constitué d'un plan de scintillateurs horizontaux et d'un plan de scintillateurs verticaux, eux-même constitués de :

- 16 scintillateurs standards, de dimension $1203 \times 50 \times 10$ (en mm), répartis en deux groupes de 8 situés à chaque extrémité.
- 16 scintillateurs minces, de dimension $1204 \times 25 \times 13$ (en mm), situés au centre du plan.

Nous pouvons remarquer que les deux types de scintillateurs n'ont pas exactement la même longueur. Cela est dû à une erreur au moment de la découpe des scintillateurs minces, tous les scintillateurs auraient normalement dû faire 1203 mm de long. Dans le Module Proton, les scintillateurs ne sont pas collés à la structure comme dans le cas d'un module standard, mais insérés dans des encoches, et maintenus en position par de la mousse.

Plans véto

Les plans véto sont situés autour de la structure principale du module. Pour permettre un accès facile au centre du module en cas de maintenance, ils ont été conçus comme des structures autonomes, pouvant être enlevées facilement. En effet les MPPC et bords des scintillateurs des plans de tracking sont situés sous les plans véto droits et supérieurs.

Chaque plan veto comporte 17 scintillateurs. Les plans véto gauche, droit et du haut utilisent des scintillateurs de dimension $1250 \times 50 \times 10$ (en mm), alors que le plan veto du bas utilise des scintillateurs de dimension $1203 \times 50 \times 10$ (en mm), en raison de la moins grande place disponible sous le module. Enfin, les plans véto gauche, droit et du dessus contiennent leur propre carte électronique (TFB), alors que le plan veto du dessous est relié au TFB du plan veto de gauche. Une photo d'un plan veto assemblé est présentée en figure 8.8.

Détails techniques

Acquisition des données

Le Module Proton utilise un système identique aux modules standards d'INGRID pour l'acquisition des données. Une fibre placée dans le scintillateur transmet la lumière à un MPPC qui la convertit en signal électrique, ensuite traité par la partie électronique. Là encore, le système est identique à ce qui est utilisé pour le reste d'INGRID. On se référera donc à la description d'INGRID dans la partie 2 pour plus de détails.

Scintillateurs

Les scintillateurs larges proviennent du même lot que ceux utilisés pour les modules standards d'INGRID. Ils sont décrits dans la partie 2. Les scintillateurs minces ou SciBar proviennent de surplus de l'expérience K2K, où ils étaient utilisés dans le détecteur SciBar. Les caractéristiques de ces scintillateurs sont les suivantes [23] :

- ils sont fabriqués par extrusion à base de polystyrène (Dow STYRRON 663) contenant du PPO et du POPOP pour respectivement 1% et 0.03% de leurs masses

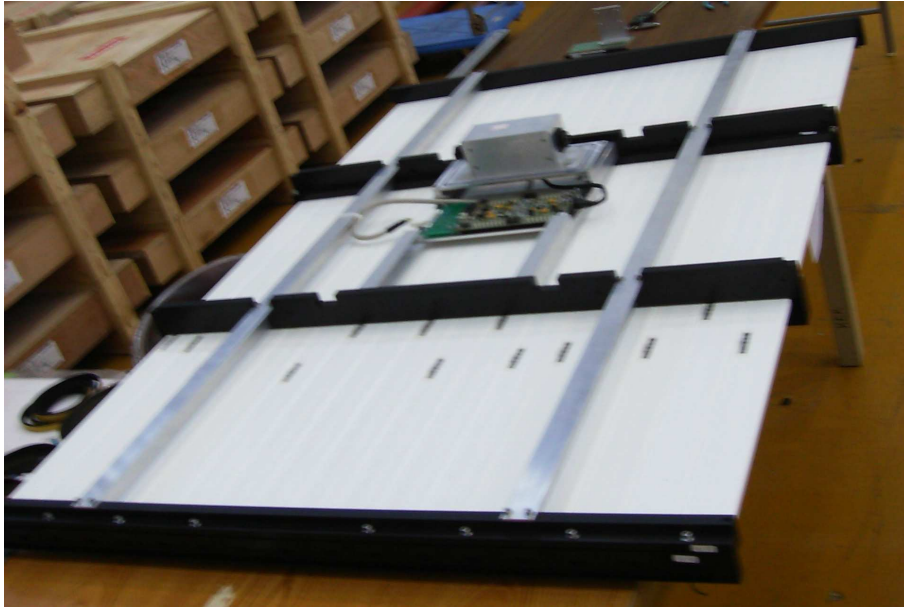


FIGURE 8.8 – Un plan veto du Module Proton assemblé, avec sa carte électronique.

- ils sont isolés par une couche de réflecteur de 0.25 mm, à base de dioxyde de titane (15% concentration massique)
- ils possèdent une section rectangulaire de dimension 25 mm × 13 mm, avec un trou au centre de 1.8 mm de diamètre pour permettre l'insertion de la fibre
- leur spectre d'émission possède un maximum pour la longueur d'onde 420 nm (bleu).

8.4 Assemblage et installation du module

Le module a été assemblé à J-PARC en juillet 2010. Aucune modification supplémentaire n'a dû être apportée par rapport au module décrit dans la section précédente. Les masses de tous les scintillateurs utilisés ont été mesurées avec une erreur inférieure à 1% (précision nominale de la balance employée pour cette mesure). En effet pour ce module, la cible est constituée uniquement de scintillateurs. Il est important de connaître précisément la masse de scintillateurs présente dans le module pour prévoir le nombre d'interactions dans les simulations. Un ensemble de photos de l'assemblage du module est présenté en annexe F.

Le module a ensuite été testé à l'aide de rayons cosmiques avant d'être installé en septembre, en même temps que les modules hors croix d'INGRID. Le module a pu être utilisé pour la deuxième période de prise de données de l'expérience T2K, à partir de novembre 2010. Ce sont ces données qui seront analysées dans la dernière partie de cette thèse, 'Analyse de données du Module Proton'.

Chapitre 9

Reconstruction des évènements

9.1 Principe général

Le “tracking” pour le Module Proton est construit sur le même principe que le tracking des modules standards d’INGRID [26]. Les projections horizontales et verticales sont traitées séparément : une trace est reconstruite sur chaque projection, puis les deux traces sont combinées pour obtenir une trace en trois dimensions.

La procédure utilisée pour reconstruire une trace par projection est la suivante : dans un premier temps les hits (scintillateurs activés, ayant reçu un dépôt d’énergie) qui seront utilisés pour la reconstruction sont sélectionnés. Pour cela, nous allons calculer pour chaque hit une densité, en fonction du nombre de hits environnants, et ne conserver que les hits dont la densité est supérieure à une valeur minimale. Cela permet de se débarrasser des hits isolés, qui sont très probablement du bruit provenant des MPPC et qui n’appartiennent pas à la trace de la particule.

La trace est ensuite reconstruite à l’aide de la transformation de Hough. Cette transformation consiste à passer de l’espace cartésien standard à l’espace de Hough. Un point dans l’espace cartésien devient une courbe dans l’espace de Hough, cette courbe représentant l’ensemble des droites du plan passant par ce point. En effet, dans l’espace de Hough les coordonnées sont r et θ , et la donnée de ces deux coordonnées permet de définir une droite par l’équation :

$$y = -\frac{\cos \theta}{\sin \theta}x + \frac{r}{\sin \theta} \quad (9.1)$$

Si il existe une droite passant par plusieurs points du plan, alors les courbes représentant ces points dans l’espace de Hough vont se couper en un point dont les coordonnées paramétrisent cette droite. Il faut donc rechercher les points d’accumulation dans l’espace de Hough pour trouver les droites passant par plusieurs hits.

Nous disposons alors d’un ensemble de droites représentant les traces possibles. Il s’agit maintenant de déterminer la plus probable. Dans le cas d’un module standard, nous commençons par vérifier que les traces ne contiennent pas de discontinuités, c’est à dire une longue partie de la trace qui ne contienne pas de hits. La longueur maximale sans hits tolérée est ici de 21.4 cm, ce qui revient à autoriser la trace à traverser au maximum 2 plans consécutifs sans laisser de hits.

Les traces ayant passé ce test sont ensuite comparées selon le nombre de hits les constituant. Nous conserverons celle ayant le plus grand nombre de hits. Dans le cas où deux traces possèdent le même nombre de hits, la trace la plus longue est choisie. Il faut également que la trace contienne au moins 3 hits pour être conservée.

9.2 Cas du Module Proton

Le tracking du Module Proton est conçu plus spécifiquement pour reconstruire complètement les événements CCQEL, c'est à dire deux traces et un vertex. Nous allons considérer pour la suite que les événements à reconstruire sont de ce type, et tous les résultats seront donnés pour les interactions CCQEL uniquement. Nous chercherons dans le chapitre suivant à éliminer les autres types d'événements reconstruits, considérés comme du bruit de fond.

Choix de la trace

Nous voulons reconstruire deux traces, de façon séquentielle : une première trace est reconstruite, puis les hits ayant servi pour cette trace sont retirés de l'ensemble des hits disponibles pour reconstruire la deuxième trace. Nous déduisons ensuite la position du vertex des deux traces reconstruites.

Les deux traces ne sont néanmoins pas indépendantes. Elles proviennent en effet de la même interaction, et doivent en conséquence vérifier certaines propriétés, notamment se couper au niveau du vertex, ou encore vérifier la conservation de l'impulsion dans l'interaction. Le Module Proton ne possède pas de plaques de fer, les particules chargées peuvent donc parcourir une plus longue distance dans le module, et laissent plus de hits. Nous trouverons donc souvent un nombre important de traces possibles, et le fait que les deux traces ne sont pas indépendantes sera utilisé pour en éliminer un certain nombre.

Par rapport à la reconstruction dans un module standard, un certain nombre de modifications ont été apportées à la sélection de la trace la plus probable, certaines pour la première et la deuxième trace reconstruites, d'autres pour la seconde uniquement.

Modifications communes aux deux traces

Les traces approximativement horizontales ou verticales, c'est à dire dont tous les hits ont une coordonnée égale sont mal reconstruites. En effet, au moment de déterminer la direction de la trace, l'algorithme donne logiquement une direction horizontale ou verticale, ce qui ne correspond jamais à la véritable direction verticale de la trace. Cela pose problème ensuite lorsqu'il s'agit de calculer l'angle entre les trajectoires des deux particules, qui sera un paramètre important pour la sélection des interactions dans le chapitre suivant. Ces traces sont donc retirées de la liste des traces possibles.

La fonction "Checkholes", qui teste la présence de discontinuités dans les traces a également été modifiée. La reconstruction est faite sur différents modules, qui n'ont pas le même intervalle entre deux plans successifs. Le critère n'est donc plus donné en terme de distance, mais en termes de nombre de plans traversés sans laisser de hits. Le nombre maximum est toujours fixé à 2. Egalement, les traces où une discontinuité est détectée ne sont plus systématiquement rejetées. Nous allons essayer de corriger le problème en comparant le nombre de hits en amont et en aval de la discontinuité. La partie de la trace qui contient le plus de hits est conservée, puis le processus est réitéré jusqu'à l'absence de discontinuités. La trace n'est rejetée que si il n'est pas possible de trouver une sous trace sans discontinuités.

Notons également qu'une particule créée par une interaction dans le Module Proton peut sortir de ce module puis entrer dans un autre module, le plus souvent l'un des modules horizontaux. Cela laisse un trou important dans la trace, mais cette dernière ne doit pas être rejetée, le Module Proton étant justement prévu pour fonctionner avec les autres modules. Il faut donc détecter le fait qu'une trace sort du module. Nous considérerons que c'est le cas si l'un des hits de la trace est proche du bord du module, et si il y a un hit faisant partie de la trace et situé dans un autre module dans cette direction.

Les traces potentielles ayant passé ces tests sont finalement comparées selon le nombre de hits les constituant. Un changement par rapport au tracking standard d'INGRID, est que dans le cas où deux traces possèdent le même nombre de hits, celle ayant le hit de coordonnée z la plus faible est conservée.

Modifications spécifiques à la seconde trace

Le fait que les deux traces ne sont pas indépendantes fournit des informations pour la détermination de la deuxième trace. La première trace servira de référence pour évaluer les candidats possible pour la deuxième trace.

Une des conditions est moins stricte pour la seconde trace. La première trace devait contenir au moins 3 hits pour être conservée, alors que 2 hits seulement sont requis pour la seconde. Les 2 traces peuvent également avoir en commun les hits correspondant aux extrémités de la première trace, car les deux traces sont sensées se couper au niveau du vertex.

La première information utilisée est la conservation de l'impulsion lors de l'interaction, donnée par l'équation suivante :

$$\nu + n \rightarrow \mu + p^+ \quad (9.2)$$

Le neutrino arrive avec une direction quasi-parallèle à l'axe z. Le recul du neutron peut emporter une partie de l'impulsion initiale, néanmoins le proton et le muon devraient partir avec des directions différentes sur les axes x et y par conservation de l'impulsion. Cela est pris en compte en rejetant les traces où ces deux particules partent du même côté de l'axe x ou y, avec une pente supérieure à 0.1. Cette tolérance est due à l'incertitude sur la reconstruction de la pente.

Les deux traces doivent se couper au niveau du vertex de l'interaction. Ce vertex doit être proche de l'une des extrémités de la première trace. La deuxième trace doit passer à moins de 5cm (un scintillateur standard) de l'une des extrémités de la première trace pour être conservée.

Corrections apportées aux traces reconstruites

Un certain nombre de corrections sont ensuite apportées aux traces reconstruites par la méthode de Hough. Ces corrections sont différentes pour la première et la deuxième trace.

Corrections apportées à la première trace

Nous commençons par reconstruire une trace à proprement parler. Pour cela les hits de la trace sélectionnés par la méthode de Hough sont interpolés par une droite. La trace est ensuite affinée, en éliminant tous les hits situés à plus de 2.5 cm de la droite précédemment reconstruite. En effet ces hits trop éloignés réduisent la précision de la reconstruction, et ils sont potentiellement des hits de la seconde trace.

La méthode de Hough oublie parfois certains hits, qui bien que proches de la droite reconstruite n'ont pas été inclus dans la trace reconstruite par cette méthode. Pour corriger ce problème, tous les hits situés à moins de 2.5 cm de la droite reconstruite sont ajoutés à la trace.

L'angle d'ouverture

Nous avons choisi un critère permettant de juger de la bonne reconstruction des deux traces : il s'agit de l'angle entre la trace du muon et la trace du proton, parfois appelé angle d'ouverture. C'est un bon critère car pour que cet angle soit correctement reconstruit, il faut que les deux traces soient correctement reconstruites. Ce sera un paramètre important dans la suite. La distribution de cet angle dans le cas des événements de type CCQEL est indiquée sur la figure 9.1.

Corrections apportées après la détermination de la seconde trace

L'un des principaux problèmes observé est lié au fait que les traces sont reconstruites indépendamment sur chaque projection. Il se peut que la première trace identifiée sur un plan corresponde à la particule dont la trace est reconstruite en second sur la deuxième projection. Nous risquons alors d'assembler la trace du proton sur une projection avec la trace du muon sur l'autre. Ce problème peut être évalué grâce à l'angle d'ouverture : dans le cas où cette inversion se produit, l'angle reconstruit sera très différent de l'angle réel.

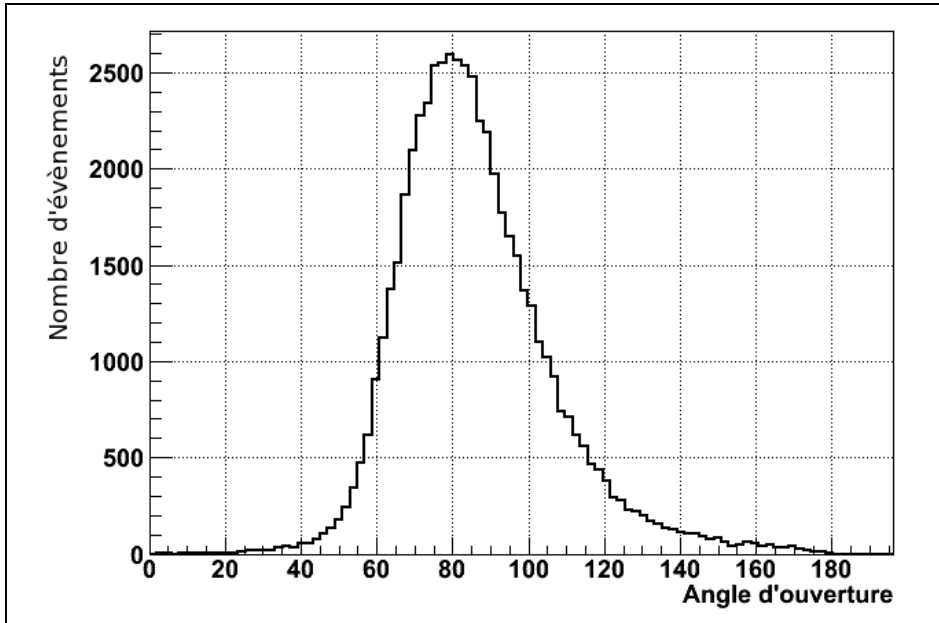


FIGURE 9.1 – Distribution de l'angle d'ouverture pour les événements CCQEL

Pour remédier à ce problème, nous regardons la direction de chaque trace selon l'axe z sur chaque plan. Cette direction est définie en utilisant le vertex reconstruit comme origine. Si pour les deux traces, les projections sur chaque plan ont des directions différentes, les projections sur le plan horizontal des deux traces sont interverties.

Nous allons ensuite déplacer les hits de la première trace situés du mauvais côté du vertex. En effet, la particule part dans une direction à partir du vertex, et ne devrait pas laisser de hits des deux côtés de ce vertex, à part peut-être quelques uns à proximité immédiate du point d'interaction. Une procédure similaire est appliquée à la seconde trace, en considérant qu'elle ne doit laisser de hits que d'un seul côté de la première trace, pour des raisons identiques. Nous déterminons donc le côté de la trace où il y a le plus de hits, et les hits situés de l'autre côté sont retirés de la trace. Nous laisserons cependant une tolérance de quelques centimètres à chaque fois, car parfois les dépôts d'énergie n'ont pas uniquement lieu là où la particule est passée, mais également sur les scintillateurs avoisinants.

9.3 Sélection des événements bien reconstruits

Nous disposons maintenant d'un ensemble d'événements reconstruits, et nous ne souhaitons conserver que les événements bien reconstruits. Pour cela une méthode de vraisemblance est utilisée. Pour remplir les histogrammes, un événement sera considéré comme bien reconstruit si l'erreur calculée avec le MC sur l'angle d'ouverture est inférieure à 10° , mal reconstruit dans le cas contraire.

Variables utilisées

Cette sélection est effectuée à l'aide d'un ensemble de six variables qui vont être présentées ici. Les histogrammes présentant les distributions pour chaque variable des événements bien et mal reconstruits sont placés dans l'annexe C.

Angle d'ouverture

Cette variable a déjà été présentée. Nous utilisons ici le fait que l'angle d'ouverture a une distribution bien particulière (voir figure 9.1) et qu'une mauvaise reconstruction pourrait donner un angle incompatible avec cette distribution.

DeltaZVertex

Une trace est reconstruite pour chaque particule sur chaque plan. En prenant l'intersection de ces deux traces, nous obtenons un vertex sur chaque plan. Cette variable est la différence de coordonnée z de ces deux vertex. Elle doit être faible a priori si l'évènement est bien reconstruit.

Pente Y

Cette variable correspond la différence entre les pentes des deux traces reconstruites sur le plan vertical.

Pente X

Cette variable est l'analogue de la précédente sur le plan horizontal.

Dirprob

Cette variable vaut un lorsqu'une seule particule a des traces ayant des directions selon z différentes entre les deux projections. Cela traduit un évènement mal reconstruit a priori.

SensProb

Cette variable traduit le fait que le vertex est ouvert dans le mauvais sens : par conservation de l'impulsion au niveau de l'interaction, les particules émises devraient avoir une impulsion globale dans le sens des z croissants.

ImpProb

Cette variable est l'analogue de ce qui est fait au moment de la sélection des traces, elle vaut un si les deux traces partent dans le même sens selon les axes x ou y. De par la tolérance qui avait été laissée au moment de la reconstruction, certains évènements peuvent se trouver dans ce cas.

Résultats

Ces différentes variables permettent une bonne sélection des évènements bien reconstruits. La figure 9.2 représente la valeur de la variable de vraisemblance pour les évènements bien et mal reconstruits. Le tableau 9.1 donne les résultats de la reconstruction selon la valeur de la coupure sur la probabilité.

La variable de la probabilité est calculée en utilisant les histogrammes présentés dans l'annexe C. Deux probabilités intermédiaires sont définies : évènement bien reconstruit (PG) et mal reconstruit (PB). PG est calculée de la façon suivante : pour chaque variable, la valeur de l'histogramme pour les évènements bien reconstruits à l'abscisse correspondant à la valeur de la variable pour l'évènement considéré est relevée. PG est obtenue en multipliant les valeurs ainsi obtenues pour chaque variable. PB est calculée d'une façon similaire, et la probabilité finale est ensuite définie par :

$$P = \frac{PG}{PG + PB}$$

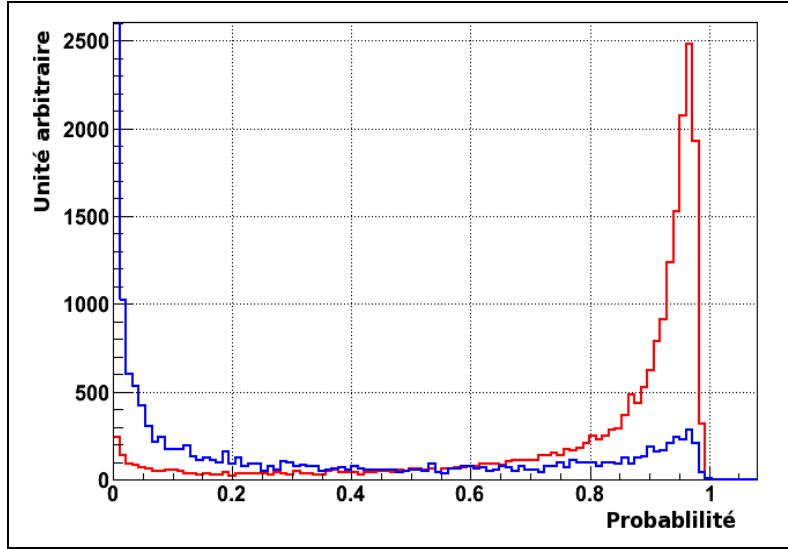


FIGURE 9.2 – Distribution de la variable de probabilité, pour les événements bien (rouge) et mal (bleu) reconstruits

	Sans sélection	P>0.1	P>0.3	P>0.5	P>0.9
Erreur angle d'ouverture (RMS)	16.69	9.17	7.47	6.27	4.585
Erreur angle d'ouverture (σ)	4.39	3.96	3.73	3.59	3.21
Nombre d'événements reconstruits	25497	22092	20701	19480	12276
Pourcentage d'événements conservés par rapport à sans sélection	100	86.64	81.19	76.40	47.27

TABLE 9.1 – Performance de l'algorithme de sélection des événements bien reconstruits

Cette probabilité sera parfois appelée variable de vraisemblance, ou vraisemblance par la suite.

Pour garder un bon compromis entre précision et statistique, nous conserverons pour la suite les événements ayant une probabilité supérieure à 0.1. Il apparaît en effet sur la figure 9.2, que la plupart des événements mal reconstruits ont une probabilité inférieure à 0.1.

9.4 Effet sur l'espace de phase

Nous allons étudier dans cette partie l'effet du tracking et de la sélection des événements bien reconstruits sur les paramètres du plan de phase. Nous voulons vérifier que ces processus ne sélectionnent pas certains événements par rapport à d'autres selon des paramètres de cet espace de phase. Cela rendrait moins fiable l'utilisation des données de section efficace, qui sont intégrées sur les différents paramètres du plan de phase. Nous allons également évaluer l'impact de la reconstruction sur ces paramètres : tous les événements ne sont pas reconstruits, et nous souhaitons savoir si la reconstruction privilégie un certain domaine de l'espace de phase.

Energie du neutrino incident

Nous cherchons à savoir si la reconstruction et la sélection des évènements bien reconstruits ne sélectionne pas les interactions selon l'énergie du neutrino incident. Pour cela les distributions en énergie du neutrino incident pour tous les évènements avant reconstruction, pour les évènements reconstruits et pour les évènements reconstruits ayant passé la sélection sont comparées. Pour permettre une meilleur comparaison, les histogrammes sont normalisés (figure 9.3).

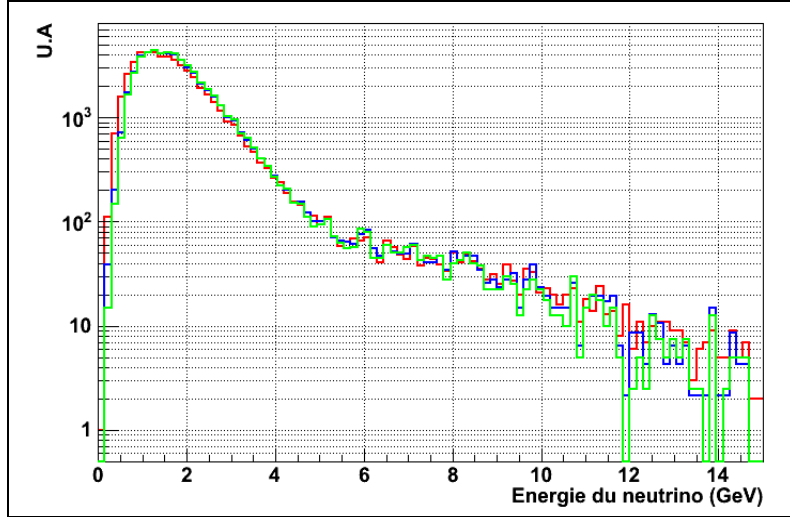


FIGURE 9.3 – Energie du neutrino incident, pour tous les évènements (rouge), les évènements reconstruits (bleu) et les évènements reconstruits ayant passé la sélection(vert)

Ces distributions sont très similaires à partir de 1 GeV, ni la reconstruction ni la méthode de sélection des évènements bien reconstruits n'ont d'impact sur le spectre en énergie des neutrinos incidents pour les énergies supérieures à 1 GeV. Pour les énergies inférieures, la reconstruction semble moins bien fonctionner. Cela pourrait provenir du fait que les interactions de neutrinos de plus faibles énergies produisent des particules moins énergétiques, qui vont donc traverser moins de plaques de fer et laisser moins de hits dans le détecteur, ce qui rend l'évènement plus difficile à reconstruire. Il faudra lors de l'analyse tenir compte de cette variation de l'efficacité de reconstruction avec l'énergie.

Moment transféré

Par analogie avec les interactions profondément inélastiques [29] nous allons définir un moment transféré Q^2 . Pour cela, l'interaction est modélisée par le diagramme de Feynman représenté en figure 9.4.

Q^2 est défini comme le carré de q , la quadri-impulsion du W^+ échangé dans cette interaction. C'est le moment transféré par le neutrino au noyau pour permettre cette réaction.

Par conservation de la quadri-impulsion au niveau du vertex :

$$q = k - k' = (E - E', \vec{k} - \vec{k}')$$

$$q^2 = -(E - E')^2 + (\vec{k} - \vec{k}')^2$$

si la métrique est $\eta = (-1, 1, 1, 1)$.

$$q^2 = 2EE' - 2\vec{k} \cdot \vec{k}' + (\vec{k}^2 - E^2) + (\vec{k}'^2 - E'^2)$$

$$q^2 = 2EE' - 2\vec{k} \cdot \vec{k}' - m_\nu^2 - m_\mu^2$$

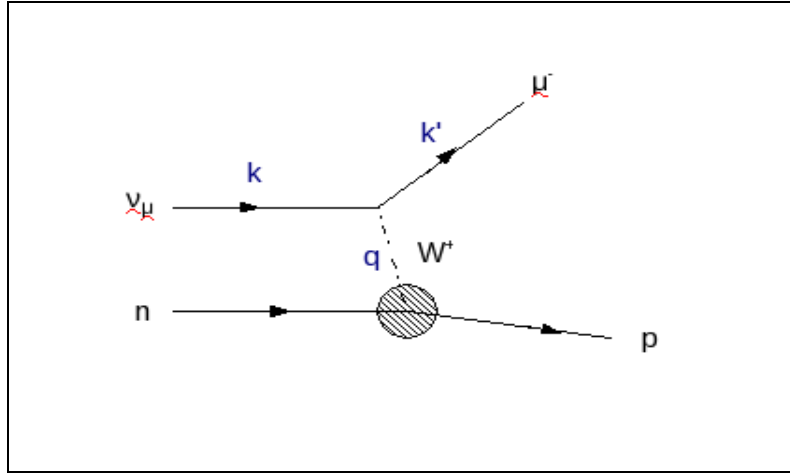


FIGURE 9.4 – Interaction CCQEL pour le calcul de Q^2

En négligeant la masse du neutrino, nous obtenons finalement :

$$Q^2 = 2(E_\mu E_\nu - \vec{k}_\nu \cdot \vec{k}_\mu) - m_\mu^2 \quad (9.3)$$

Les distributions peuvent être comparées comme dans le cas de l'énergie du neutrino incident (figure 9.5).

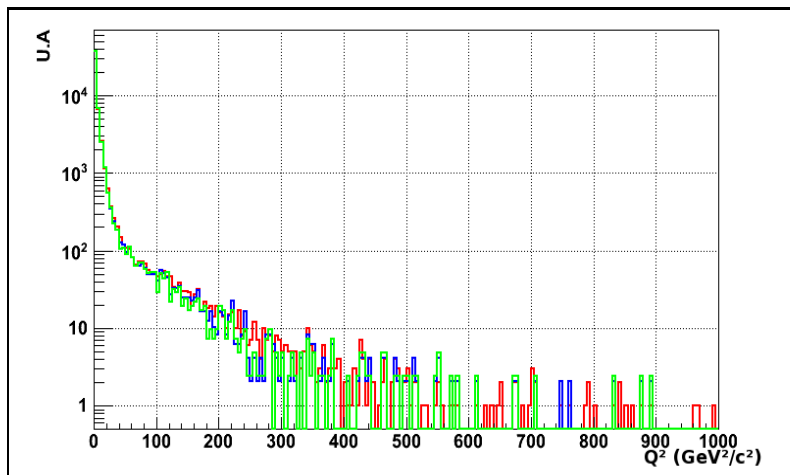


FIGURE 9.5 – Moment transféré pour tous les évènements (rouge), les évènements reconstruits (bleu) et les évènements reconstruits ayant passé la sélection(vert)

Moment transverse

La dernière grandeur que nous allons étudier est le moment transverse du neutrino incident. Ce moment transverse correspond à la norme du vecteur quantité de mouvement dans le plan perpendiculaire à la direction du faisceau. Les distributions de ce moment transverse dans les 3 mêmes cas que précédemment sont comparées sur la figure 9.6.

Nous voyons sur cette figure que la reconstruction et la sélection des évènements bien reconstruits n'ont pas d'impact sur le moment transverse des neutrinos incidents.

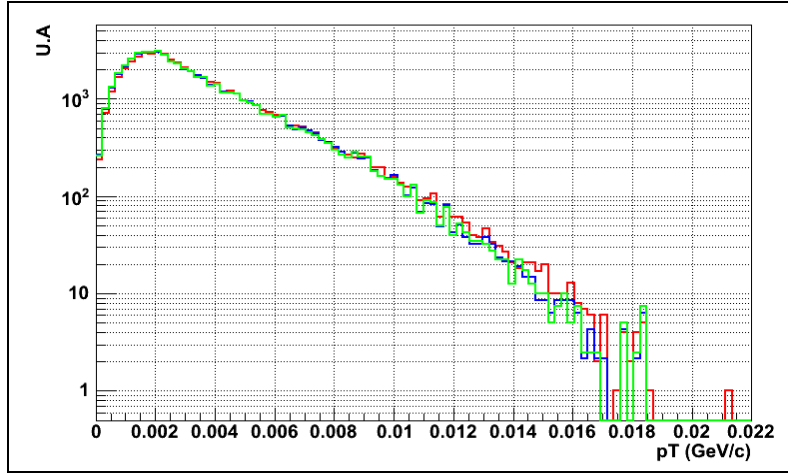


FIGURE 9.6 – Moment transverse du neutrino incident, pour tous les évènements (rouge), les évènements reconstruits (bleu) et les évènements reconstruits ayant passé la sélection(vert)

9.5 Performances de la reconstruction des évènements CCQEL

Nous pouvons mesurer l'efficacité de la reconstruction, c'est à dire le pourcentage d'évènements potentiellement restructuribles (évènements qui avaient passé le test d'acceptance) qui ont été effectivement reconstruits. Comme dans le cas de l'acceptance, les résultats sont séparés entre première et deuxième traces (table 9.2).

	Efficacité (%)
Reconstruction première trace	98.08
Reconstruction deuxième trace	73.58
Reconstruction deuxième trace et sélection par vraisemblance	63.75

TABLE 9.2 – Efficacité de reconstruction des évènements CCQEL pour le Module Proton

Nous pouvons remarquer que cette efficacité semble plus faible que celles mesurées au moment de l'étude des géométries possibles pour le module, qui avoisinaient les 80% pour la reconstruction de la seconde trace. L'explication est que l'algorithme de tracking a été affiné après que la géométrie finale ait été fixée, pour permettre une meilleure sélection des interactions, procédure qui sera détaillée dans le chapitre suivant. Par rapport à l'algorithme présenté au chapitre précédent, un certain nombre de coupures et d'opérations sur les traces ont été ajoutées. Dans le chapitre précédent, les résultats qui ont conduit au choix de la géométrie sont présentés, il a donc été décidé de présenter à ce moment les résultats qui avaient réellement été utilisés pour le choix de la géométrie. Les résultats présentés ici peuvent être considérés comme les résultats définitifs pour l'analyse présentée dans le chapitre suivant.

En multipliant l'acceptance par l'efficacité de tracking (table 8.7), nous obtenons la proportion d'évènements reconstruits par rapport au total des évènements ayant interagit dans le Module Proton.

Cela signifie que si un évènement reconstruit est défini comme un évènement où deux traces ont été reconstruites, et qui a passé le test de vraisemblance pour une bonne reconstruction, alors à l'aide de cette algorithme 63.75% des évènements potentiellement restructuribles ont été reconstruits, ce qui correspond à 40.66% du total des évènements. Il est possible d'ajuster la précision de la reconstruction selon les études à mener : selon la coupure faite sur la variable de probabilité, l'erreur sur l'angle reconstruit

	Proportion (%)
Reconstruction première trace	96.20
Reconstruction deuxième trace	46.93
Reconstruction deuxième trace et sélection par vraisemblance	40.66

TABLE 9.3 – Proportion d'évènements CCQEL reconstruits dans le Module Proton

varie entre 9° et 4.5° , mais la statistique diminue lorsque nous cherchons à améliorer la précision. Enfin, cette reconstruction et la sélection des évènements bien reconstruits se font avec peu d'impact sur l'espace de phase, il faudra simplement tenir compte de l'effet de seuil en énergie pour l'efficacité de reconstruction au moment de l'analyse des données.