

# Principe général de l'expérience

## 3.1 La situation avant T2K

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre précédent, les paramètres de la matrice de mélange décrivant l'oscillation quantique des neutrinos commencent à être bien connus. Néanmoins, ils le sont avec une précision inégale. En particulier, l'incertitude sur les paramètres atmosphériques est grande, et il n'y a au moment de l'écriture de cette thèse qu'une limite supérieure sur la valeur de  $\theta_{13}$ . Ces paramètres peuvent être mesurés par une expérience d'oscillation utilisant des neutrinos muoniques produits par accélérateur. Une particularité de T2K est qu'il s'agit d'une expérience d'apparition : la plupart des précédentes expériences d'oscillation mesuraient la disparition de neutrinos d'une certaine saveur, alors que T2K va chercher l'apparition de neutrinos électroniques dans un faisceau de neutrinos muoniques.

## 3.2 Objectifs de l'expérience

L'expérience T2K, *Tokai to Kamioka*, est une expérience d'oscillation à base longue utilisant un accélérateur de particules pour remplir trois objectifs principaux.

### a) Mesure de $\theta_{13}$

Il s'agit de l'objectif principal de l'expérience T2K.  $\theta_{13}$  est le seul angle de mélange qui n'a pas été mesuré expérimentalement comme non nul. Sa mesure est importante, car une violation de symétrie CP dans le phénomène d'oscillation quantique des neutrinos n'est possible que si les trois angles de mélange sont non nuls.

Cet angle peut être mesuré en étudiant soit les oscillations de neutrinos muoniques produits par un accélérateur, soit celles des anti-neutrinos électroniques produits par un réacteur nucléaire. Un effort expérimental important est en cours pour le mesurer, en utilisant des accélérateurs ou des réacteurs comme source de neutrinos. La sensibilité de ces expériences est détaillée dans la figure 3.1 [10]. Les expériences RENO, Dayabay et *No $\nu$ a* sont des projets actuellement en construction, alors que T2K et Double CHOOZ avaient déjà commencé la prise de données au moment de la rédaction de cette thèse.

### Mesure de $\theta_{13}$ dans une expérience avec accélérateur

$\theta_{13}$  peut être mesuré en étudiant l'oscillation d'un faisceau de neutrinos muoniques en neutrinos électroniques. Il s'agit bien d'une expérience d'apparition : les neutrinos vont être détectés dans une saveur différente de celle dans laquelle ils ont été produits.

En négligeant les effets de la matière, le terme principal décrivant ces oscillations est obtenu à partir des formules présentées au chapitre 2 :

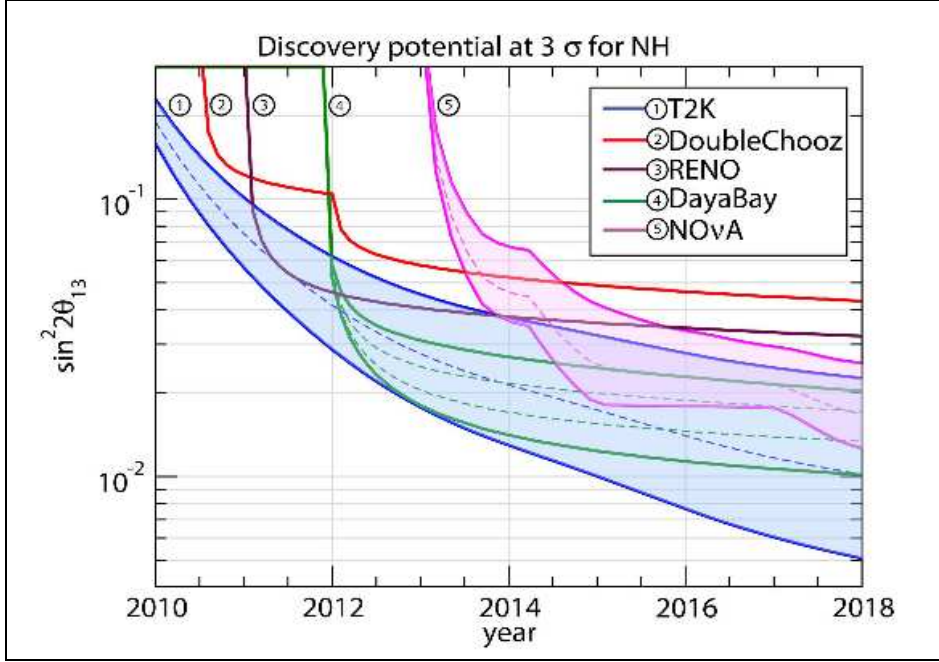


FIGURE 3.1 – Potentiel de découverte à  $3\sigma$  des principales expériences mesurant  $\theta_{13}$ , dans le cas d'une hiérarchie de masse normale. La largeur de la bande dans les cas de T2K et NO $\nu$ A provient de l'influence de  $\delta$ .

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx 4 \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \theta_{13} \sin^2 \left( 1.27 \Delta m_{13}^2 \frac{L}{E} \right)$$

Puis en utilisant la formule  $2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$ , nous obtenons :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left( 1.27 \Delta m_{13}^2 \frac{L}{E} \right) \quad (3.1)$$

La connaissance de  $\sin^2 \theta_{23}$  permet ainsi de mesurer  $\theta_{13}$  et  $\Delta m_{13}^2$ . Cette détermination est beaucoup plus compliquée dans les faits : les interactions dans la matière ne peuvent pas être totalement négligées pour une expérience à base longue (comme expliqué au chapitre 2), et les termes d'ordres supérieurs dans la probabilité d'oscillation font intervenir l'ensemble des 6 paramètres décrivant les oscillations de neutrinos [10]. Il est nécessaire de tenir compte de ces termes pour une mesure précise de  $\theta_{13}$ .

### Sensibilité visée par T2K

La première phase de l'expérience est prévue pour accumuler des données équivalentes à 5 ans de prises de données avec un faisceau d'intensité 750MW, soit  $5 \cdot 10^{21}$  protons sur cible. Dans ce cas, et si les erreurs systématiques peuvent être maintenues inférieures à 10%, la sensibilité obtenue à 90% C.L est :

$$\sin^2 2\theta_{13} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ soit } \theta_{13} = 2.2^\circ$$

La sensibilité dépend évidemment de la valeur de  $\Delta m_{13}^2$ , la sensibilité à  $\theta_{13}$  en fonction de la valeur de  $\Delta m_{13}^2$  est présentée en figure 3.2, où une éventuelle violation de symétrie CP n'est pas prise en compte ( $\delta=0$ ).

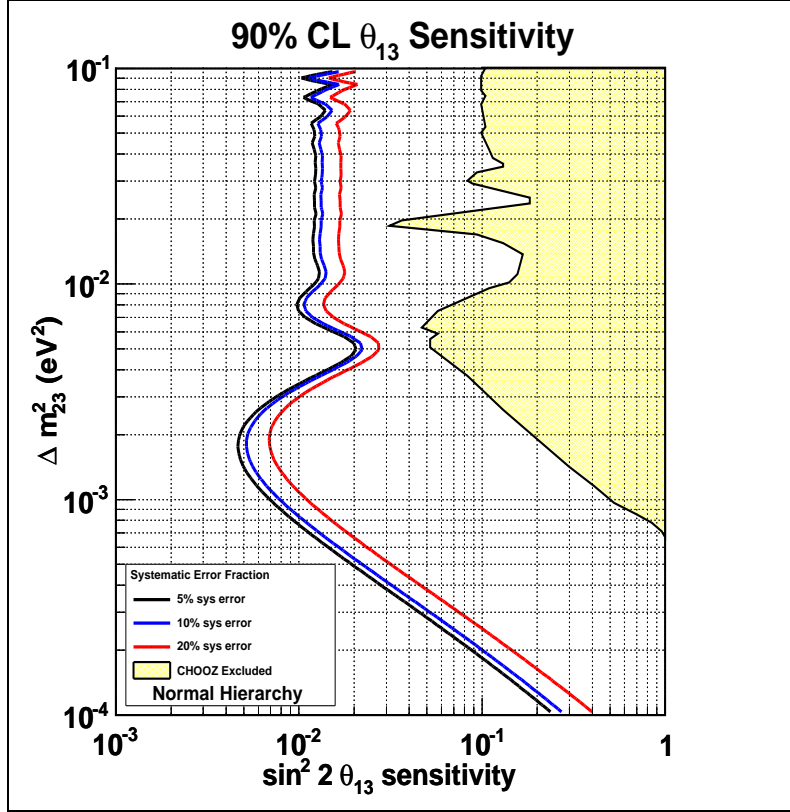


FIGURE 3.2 – Sensibilité de T2K pour  $\theta_{13}$  après 5 ans de fonctionnement [15].

## b) Amélioration de la mesure des paramètres atmosphériques

Les paramètres atmosphériques de la matrice de mélange ont été mesurés, ils ne sont néanmoins pas connus avec la même précision que les paramètres solaires. De plus, comme le montre l'équation 4.1, ces paramètres influent sur la détermination de  $\theta_{13}$ . Une meilleure connaissance de leurs valeurs facilitant donc la mesure de  $\theta_{13}$ , l'expérience T2K va également s'intéresser à leur mesure.

Une expérience avec accélérateur permet de mesurer les paramètres atmosphériques en étudiant la disparition des neutrinos muoniques du faisceau. Si comme précédemment l'influence de la matière et la violation éventuelle de symétrie CP sont négligées, le terme principal dans l'expression de cette probabilité d'oscillations est :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_x) \approx 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left( 1.27 \Delta m_{23}^2 \frac{L}{E} \right) \quad (3.2)$$

Le terme  $\cos^4 \theta_{13}$  n'est certes pas connu, néanmoins comme  $\theta_{13}$  est petit ( $\theta_{13} < 11^\circ$ ),  $\cos^4 \theta_{13}$  devrait être très proche de 1. Comme précédemment certaines approximations ont été nécessaires pour arriver à cette formule, et la véritable formule est un peu plus compliquée.

### Sensibilité visée par T2K

Avec les mêmes hypothèses que précédemment, T2K cherche à déterminer les paramètres atmosphériques avec la précision suivante :

$$\begin{aligned} \delta(\sin 2\theta_{23}) &< 0.01 \\ \delta(|\Delta m_{32}^2|) &< 10^{-4} eV^2 \end{aligned}$$

La sensibilité de T2K pour les paramètres atmosphériques est représentée en figure 3.3.

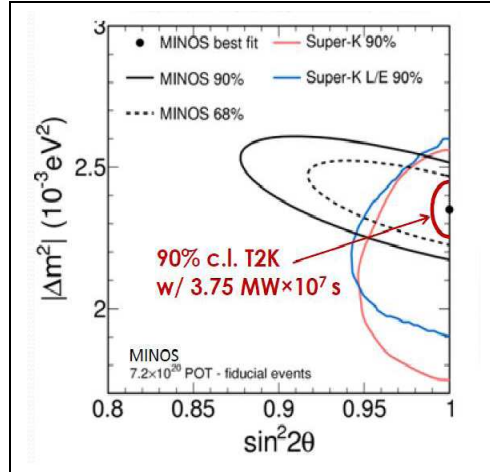


FIGURE 3.3 – Sensibilité de T2K pour les paramètres atmosphériques après 5 ans de fonctionnement, et comparaison avec les résultats des expériences MINOS et Super Kamiokande [16].

Cette sensibilité peut être comparée avec les derniers résultats de l'expérience MINOS [17] :

$$\begin{aligned} \sin^2 2\theta_{23} &> 0.91 \text{ (90\% CL)} \\ |\Delta m_{32}^2| &= 2.35_{-0.08}^{+0.11} \times 10^{-3} eV^2 \end{aligned}$$

La précision des deux expériences devraient donc être similaire pour ce qui concerne la différence de masse, mais T2K aura une meilleure précision pour la valeur de l'angle de mélange.

### c) Violation de symétrie CP

Nous avons vu dans la première partie qu'une violation de symétrie CP pourrait être observée en comparant les oscillations des neutrinos et celles des anti-neutrinos. Ce phénomène ne peut être observé que si les trois angles de mélange sont non nuls, et se traduit par la présence d'une phase  $\delta$  dans la matrice de mélange. Dans une expérience avec accélérateur, il est possible de changer le faisceau de neutrinos en un faisceau d'anti-neutrinos relativement facilement. Cela constituera la deuxième phase de l'expérience T2K.

Il est possible de chercher une violation de symétrie CP en étudiant l'apparition de  $\nu_e$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$ . Si l'on prend en compte cette fois l'influence de la phase  $\delta$ , l'expression de la probabilité pour cette oscillation contient le terme :

$$-8 \cos^2 \theta_{13} \cos \theta_{12} \cos \theta_{23} \sin \delta \sin \theta_{12} \sin \theta_{13} \sin \theta_{23} \sin \left( \Delta m_{32}^2 \frac{L}{4E} \right) \sin \left( \Delta m_{31}^2 \frac{L}{4E} \right) \sin \left( \Delta m_{21}^2 \frac{L}{4E} \right)$$

Ce terme est impair par rapport à la symétrie CP. Nous avons vu dans la partie 1 que passer des oscillations de neutrinos aux oscillations d'anti-neutrinos revenait à transformer la matrice de mélange en son complexe conjugué, ce qui revient à changer  $\delta$  en  $-\delta$ . Ce terme change donc de signe lors du passage des neutrinos aux anti-neutrinos, permettant ainsi une mesure de  $\delta$ .

Nous pouvons également remarquer que les trois angles de mélange apparaissent sous forme de sinus : ce terme disparaît bien si l'un des angles de mélange est nul (ce qui est toujours possible pour  $\theta_{13}$ ).

Néanmoins, cette mesure est loin d'être aisée : ce terme impair n'est pas le terme principal dans l'expression de la probabilité (qui est toujours donné par l'équation 3.1). De plus il fait intervenir tous les paramètres de la matrice de mélange, une erreur sur ces paramètres entraîne donc aussi une erreur sur la mesure de  $\delta$ . Enfin, ici les effets de la matière n'ont pas été pris en compte. La propagation

dans la matière ajoute des termes supplémentaires dans l'expression de la probabilité d'oscillation, dont certains changent de signe lors du passage des neutrinos aux anti-neutrinos. Il faut donc pouvoir séparer la violation de symétrie CP dans le phénomène d'oscillations de ce qui provient de la propagation dans un milieu matériel.

Il faut donc pour pouvoir mesurer  $\delta$  une expérience très précise avec des erreurs statistiques et systématiques très faibles, tout en conservant une base pas trop longue (moins de 1000 km) pour que les effets de la matière sur la probabilité d'oscillation ne deviennent pas trop compliqués.

## Chapitre 4

# Principe général de l'expérience

L'expérience T2K est une expérience à base longue d'oscillations, utilisant un accélérateur pour produire des neutrinos. Schématiquement, un faisceau de neutrinos muoniques est produit à partir d'un accélérateur : des protons sont accélérés, puis envoyés sur une cible de carbone. Les collisions produisent des particules secondaires (pions, kaons) qui se désintègrent en produisant des neutrinos muoniques. Un faisceau de  $\nu_\mu$  est ainsi produit. Ensuite un ensemble de détecteurs proches situés à 280 mètres de la cible mesure le flux de neutrinos. A partir de cette mesure, il est possible d'extrapoler le flux de neutrinos qui devrait traverser le détecteur lointain, situé à 295 kilomètres de la cible, en l'absence d'oscillations de saveurs. En comparant cette extrapolation au flux de neutrinos effectivement mesuré dans le détecteur lointain, nous pouvons mesurer la proportion de neutrinos qui ont changé de saveur au cours de la propagation, et ainsi en déduire les valeurs des paramètres de la matrice de mélange.

Par rapport aux précédentes expériences d'oscillations utilisant un accélérateur (MINOS, OPERA,...), T2K présente une particularité notable : c'est la première expérience hors-axe.

### 4.1 Expérience hors axe

Dans T2K, le détecteur lointain n'est pas placé sur l'axe du faisceau de neutrinos, mais dans une direction faisant un angle de  $2.5^\circ$  avec ce dernier. Cela peut paraître étrange au premier abord : le flux de neutrinos est plus important sur l'axe du faisceau que dans les autres directions, nous allons donc réduire la statistique en procédant ainsi. Néanmoins ce système présente plusieurs avantages, notamment au niveau de la réduction du bruit de fond.

#### Sélection en énergie

Nous avons vu dans la partie 1 que la probabilité d'oscillations dépendait du rapport *distance parcourue* sur *énergie du neutrino*. Il est souhaitable de choisir ce rapport de façon à maximiser la probabilité de l'oscillation étudiée. Dans le cas de T2K, l'emplacement de l'accélérateur et du détecteur lointain sont fixés, le seul paramètre ajustable est l'énergie des neutrinos.

Une expérience hors axe est un moyen de sélectionner l'énergie moyenne des neutrinos du faisceau. Cela tient à la cinématique des réactions de désintégration produisant les neutrinos. La réaction principale est  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ . Pour cette désintégration, l'énergie du neutrino produit peut être reliée à l'impulsion du pion par la formule :

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (4.1)$$

Nous pouvons tracer pour différentes valeurs de l'angle hors-axe représenté par  $\theta$  dans l'équation précédente, la valeur de l'énergie du neutrino produit en fonction de l'impulsion du pion se désintégrant (figure

4.1, [18]). Il apparaît qu'au fur et à mesure que l'angle hors-axe augmente, l'énergie du neutrino varie de moins en moins avec l'impulsion du pion. Ainsi, pour un angle hors axe suffisamment important nous obtenons un spectre piqué en énergie, visible sur la figure 4.2.

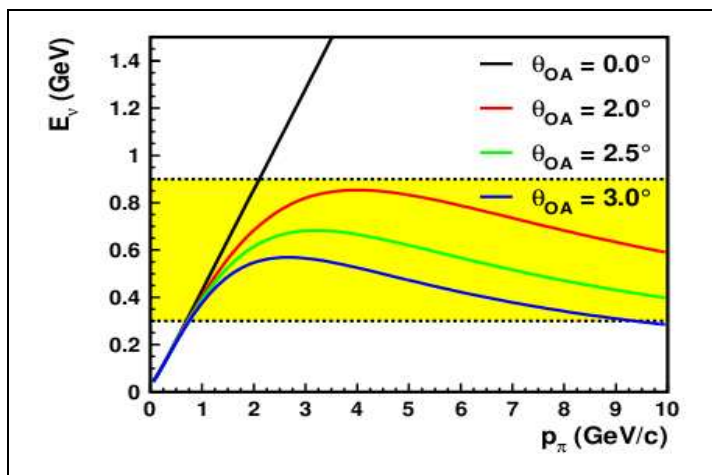


FIGURE 4.1 – Energie du neutrino produit en fonction de l'impulsion du pion pour différents angles hors-axe. En jaune la gamme d'énergie sélectionnée pour un angle hors axe compris entre 2 et 3°.

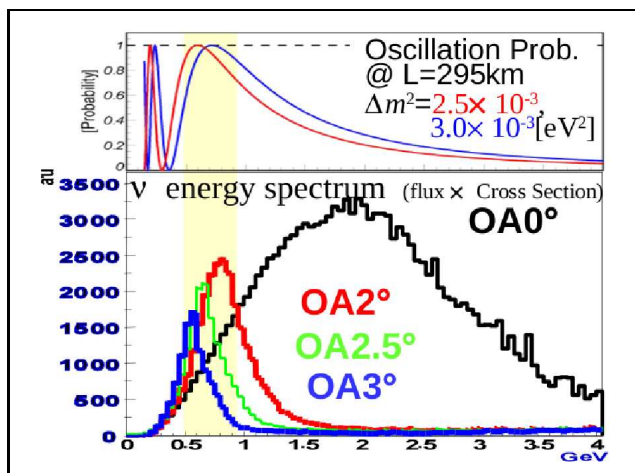


FIGURE 4.2 – Spectre en énergie pour différents angles hors axe. Comparaison avec la probabilité d'oscillations

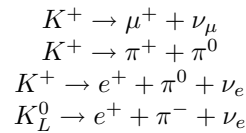
Cette sélection en énergie présente deux avantages principaux. Nous voyons sur la figure 4.2 que le nombre de neutrinos ayant une énergie correspondant au maximum d'oscillation a augmenté, ce qui augmente le signal. Nous pouvons également remarquer que le nombre de neutrinos à haute énergie a grandement diminué. Cela réduit le bruit de fond : en effet les neutrinos de haute énergie peuvent produire par courants neutres des  $\pi^0$  qui constituent un bruit de fond pour la détection des  $\nu_e$ . Ces deux effets améliorent donc le rapport signal sur bruit de l'expérience.

Pour obtenir un bon compromis entre un spectre étroit en énergie et un flux centré au niveau du maximum de la probabilité d'oscillation, T2K a décidé de fonctionner avec un angle hors-axe de 2.5°. Il faut par ailleurs pouvoir mesurer cet angle précisément pour connaître les propriétés du faisceau, c'est dans ce but qu'a été conçu le détecteur INGRID, objet principal de cette thèse.

## Réduction du bruit de fond $\nu_e$

Le but principal de l'expérience est de mesurer  $\theta_{13}$  en observant l'apparition de  $\nu_e$  dans un faisceau de  $\nu_\mu$ . Toute contamination du faisceau en  $\nu_e$  est donc un bruit de fond problématique qui doit être limité autant que possible. Une certaine contamination est inévitable dans une expérience utilisant un faisceau de neutrinos classique produit par désintégration de particules secondaires provenant de la collision de protons sur une cible. Nous avons considéré dans le paragraphe précédent uniquement la désintégration de  $\pi^+$  en  $\nu_\mu$ , mais ce n'est pas la seule réaction qui se produit.

Les collisions de protons sur la cible produisent également des kaons. Ces kaons peuvent se désintégrer selon les réactions suivantes :



Les deux premières désintégrations ne sont pas problématiques : la première donne la même chose que la voie étudiée précédemment, et la seconde produit un  $\pi^+$  qui pourra fournir la désintégration souhaitée.

Les deux dernières par contre produisent des  $\nu_e$ , et sont inévitables dans ce type d'expériences. Néanmoins, pour des raisons de cinématique de désintégration, cette contamination peut être réduite en travaillant hors-axe. Avec un angle de  $2.5^\circ$ , la contamination attendue est de l'ordre de 0.5%, alors qu'elle serait de l'ordre de 1% sur l'axe.

## 4.2 Vue d'ensemble

Nous allons étudier dans les paragraphes suivants les différentes parties de l'expérience, en suivant la séquence de production et de détection des neutrinos. Une description schématique de l'expérience est présentée en figure 4.3.

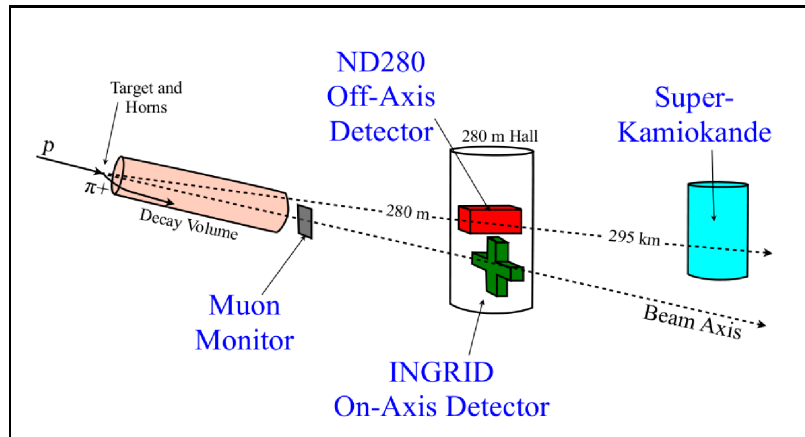


FIGURE 4.3 – Vue d'ensemble de l'expérience T2K [19]

La première étape consiste à accélérer un faisceau de protons. Cela est fait à l'aide d'une séquence de trois accélérateurs à J-PARC, situé sur la côte est du Japon. Ce faisceau est ensuite extrait vers la ligne de faisceau neutrino, qui le conduit vers une cible en graphite. Des collisions avec cette cible naissent des pions et des kaons. Ces particules chargées sont focalisées (ou défocalisées, selon leur charge électrique) par des cornes électromagnétiques vers un tunnel de désintégration. Dans ce tunnel, les particules secondaires



se désintègrent et produisent un faisceau de neutrinos. Un “beam dump” sert à arrêter l’ensemble des hadrons secondaires, pour s’assurer que seuls les neutrinos vont arriver aux détecteurs.

Le faisceau arrive ensuite à un premier ensemble de détecteurs, les détecteurs proches. Ceux-ci sont situés à 280 mètres de la cible, et répartis en deux groupes : sur axe et hors axe. Le détecteur sur axe, baptisé INGRID, a pour but principal de mesurer l’angle hors axe effectif du faisceau de neutrinos, en déterminant précisément la position du centre du faisceau. Les détecteurs hors axe (parfois appelés ND280) sont un ensemble de détecteurs situés dans un aimant. Leurs objectifs sont d’une part de mesurer précisément le flux de neutrinos pour pouvoir extrapoler au détecteur lointain, et d’autre part de mesurer la contamination intrinsèque du faisceau en  $\nu_e$ .

Finalement, les neutrinos arrivent au détecteur lointain, Super-Kamiokande. Celui-ci est situé à 295 kilomètres de la cible. Il a pour but de mesurer les flux des différents saveurs de neutrinos du faisceau à cet endroit. Il doit donc permettre une bonne séparation entre les  $\nu_e$  et les  $\nu_\mu$ . Le flux de neutrinos diminuant avec la distance à la cible, il doit également être suffisamment massif pour avoir une bonne statistique. Il mesure également l’énergie des neutrinos.

### 4.3 Erreurs systématiques

L’objectif de T2K est de garder les erreurs systématiques inférieures à l’erreur statistique pour cinq ans de fonctionnement de l’expérience (soit  $5 \times 10^{21}$  protons sur cible). Les sources d’erreurs systématiques sont différentes pour l’apparition des neutrinos électroniques et la disparition des neutrinos muoniques.

Dans le cas de l’apparition des  $\nu_e$ , la principale source d’erreur vient de la soustraction du bruit de fond. Il y a deux bruits de fond principaux : les  $\nu_e$  présents dans le faisceau (leur origine est expliquée dans le chapitre suivant), et les  $\pi^0$  produits par les neutrinos dans le détecteur lointain, dont le signal de détection peut imiter celui d’un  $\nu_e$ . L’erreur systématique pour la soustraction de ce bruit de fond doit rester inférieure à 10%. Les erreurs systématiques principales pour cette analyse sont résumées dans la table 4.1.

Erreur	Maximum autorisé	Sous-systèmes utilisés pour la mesure
Direction du faisceau	1 mrad	INGRID, Muon monitor
Forme du faisceau	10%	ND280, NA61, INGRID
Composante $\nu_e$ intrinsèque du faisceau	10%	ND280, NA61
Section efficace de production des $\pi^0$	10%	ND280

TABLE 4.1 – Erreurs systématiques pour l’apparition des neutrinos électroniques.

Concernant la disparition des  $\nu_\mu$ , les principales sources d’erreurs systématiques proviennent de la connaissance du flux et du spectre des  $\nu_\mu$  qui arrivent au détecteur lointain. Ces systématiques seront principalement étudiées par le groupe de détecteurs proches hors axe, plus de précisions sur ces sujets seront données dans le chapitre les décrivant.

## Chapitre 5

# L'accélérateur de J-PARC

Nous allons nous intéresser ici à la production du faisceau de neutrinos. Celle-ci a lieu au centre de J-Parc, situé à Tokai au Japon. Ce centre, dont la construction a commencé en 2001 est un projet co-géré par KEK et l'agence japonaise pour l'énergie atomique (JAEA). Il dispose d'un ensemble d'accélérateurs, permettant de produire un faisceau de protons qui est ensuite utilisé pour différentes expériences dont T2K. Une vue schématique de l'organisation du site est montrée en figure 5.1. Le premier faisceau de neutrino a été délivré par l'accélérateur en novembre 2009 et détecté par INGRID.

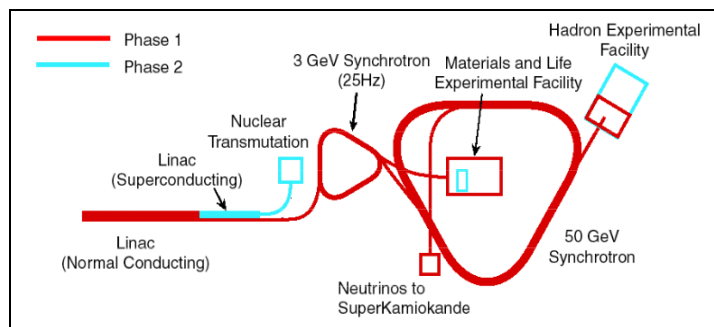


FIGURE 5.1 – Schéma des différentes structures de J-PARC.

### 5.1 La séquence d'accélération

La première opération consiste à accélérer les protons pour obtenir un faisceau de haute intensité. Cela est fait grâce à un ensemble de trois accélérateurs.

#### Les 3 accélérateurs de proton

##### Accélérateur linéaire

La première partie de la séquence d'accélération s'effectue à l'aide d'un accélérateur linéaire. Il est lui-même divisé en deux parties : la première partie est un accélérateur linéaire standard, qui amène les particules jusqu'à une énergie de 400 MeV. La deuxième partie utilise des aimants supraconducteurs pour amener les particules de 400 à 600 MeV. Cet accélérateur aura deux utilisations : une partie du faisceau est injecté dans l'accélérateur suivant (RCS, 3 GeV), l'autre partie va servir pour des expériences de transmutation nucléaire. Les particules injectées dans le RCS ne sont accélérées que jusqu'à 400 MeV, la partie accélérant jusqu'à 600 MeV ne nous intéresse donc pas ici.

A cause d'un surcoût lié à une modification de l'accélérateur suivant, l'énergie du linac est limitée à 181 MeV dans la première phase de l'expérience. Pendant cette période, l'accélérateur fonctionnera avec une fréquence de répétition de 25 Hz, avant de passer à 50 Hz lorsque les expériences de transmutation commenceront.

Le linac est tout d'abord constitué d'une source d'ions  $H^-$ , pour des raisons d'acceptance dans l'accélérateur suivant, il est préférable d'accélérer ces ions plutôt que des protons. Deux sources différentes (avec ou sans césium) peuvent être utilisées, mais dans la première phase seule la source avec césium sera utilisée. Ces ions sont produits avec une énergie de l'ordre de 50 keV. Ils sont ensuite accélérés, tout d'abord à 3 MeV par une cavité à radio fréquence quadrupolaire, puis à 50 MeV par un accélérateur linéaire à tubes à dérive et enfin jusqu'à 181 MeV par un accélérateur linéaire à tubes à dérive séparés. Toutes ces cavités accélératrices fonctionnent avec une fréquence de 324 MHz. Dans une deuxième phase, un ensemble de 21 cavités baptisées Annular-Coupled Structure accélérera les ions jusqu'à 400 MeV.

Le système d'alimentation de toutes ces cavités est complexe : pour pouvoir injecter les ions dans le RCS, l'étalement en impulsion du faisceau ( $\Delta p/p$ ) doit être inférieur à 0.1%, ce qui impose des erreurs très faibles sur les champs accélérateurs, amplitude à 1% et phase à 1° près.

### “Rapid Cycling Synchrotron”

Les ions produits dans le linac sont ensuite transformés en protons par *épluchage* (échange de charges avec des feuilles de carbone) et injectés dans le second accélérateur : le Rapid Cycling Synchrotron (RCS). C'est un synchrotron de 348.3 mètres de circonférence qui accélère les protons de 181 MeV (400 MeV dans la deuxième phase) à 3 GeV, pour ensuite les envoyer soit vers le centre de recherche médical et biologique, soit dans le cas qui nous intéresse vers l'accélérateur suivant, le main ring (MR), à l'aide d'un aimant fonctionnant par impulsion. Il fonctionne avec une fréquence de répétition de 25 Hz.

Pour contrôler la direction et la forme du faisceau, ce synchrotron utilise 24 aimants dipolaires (pour courber la trajectoire) et 60 aimants quadripolaires (pour focaliser le faisceau). Les particules sont accélérées à l'aide de champs électriques à fort gradient (supérieur à 20kV/m) [20]. Il n'est pas possible d'obtenir de tels champs avec des cavités à radio fréquence classique, des cavités à alliage magnétique sont donc utilisées. Ces cavités ont une valeur de saturation par rapport au champs magnétique plus importante que des cavités ordinaires (1.35 T par rapport à 0.28 T), ce qui permet de produire des champs à plus fort gradient. Le RCS utilise 18 de ces cavités, d'une longueur de 1.95 mètres, possédant une fréquence de résonance de 1.7 MHz et pouvant aller jusqu'à un gradient de 23kV/m.

### “Main Ring”

Le Main Ring (MR) est un synchrotron de 50 GeV, d'une circonférence de 1567.5 mètres, composé de trois sections linéaires de 116.1 mètres et de trois sections circulaires de 406.4 mètres. La trajectoire du faisceau est contrôlée par un ensemble d'aimants : 96 aimants dipolaires pour courber la trajectoire ainsi que 216 aimants quadripolaires et 72 aimants sextupolaires pour le focaliser. Ces aimants ne sont pas des aimants supraconducteurs. Les particules sont accélérées avec le même type de cavités que dans le RCS, 6 d'entre elles sont utilisées et produisent un voltage d'accélération de 280 kV [21].

Le faisceau peut ensuite être envoyé vers deux expériences différentes : par extraction lente vers le site des expériences hadroniques, ou par extraction rapide vers la ligne de faisceau neutrino, cas que nous allons maintenant étudier. Dans une première phase, cet accélérateur fonctionnera avec une énergie limitée à 30 GeV.

### Extraction

Dans le cas de T2K, les protons du MR sont extraits vers la ligne de faisceau neutrino par une méthode d'extraction rapide : tout le faisceau est envoyé d'un coup vers la ligne de faisceau neutrinos. Cette opération est effectuée dans l'une des sections linéaires du MR, à l'aide de 5 aimants *kicker*, et d'un ensemble de huit aimants *septum* (4 à fort champs et 4 à faible champs). Ce système permet d'extraire en une fois l'ensemble du faisceau présent dans le MR vers le beam dump ou la ligne de faisceau neutrinos.

La période avec laquelle l'opération peut être répétée est de 2 secondes. L'accélérateur produit ainsi des tirs de protons toutes les 2 secondes, pendant un temps d'environ 5 microsecondes.

## Ligne de faisceau neutrino

La ligne de faisceau primaire a deux objectifs : tout d'abord courber le faisceau pour l'orienter dans la direction du détecteur lointain, puis le focaliser et l'orienter de façon à ce qu'il arrive sur la cible de carbone. Juste avant cette ligne primaire, une première séquence linéaire de 54 mètres et composée de 12 aimants ordinaires et de collimateurs sert à préparer le faisceau.

Ensuite la ligne primaire courbe le faisceau pour le faire tourner de  $80^\circ$  par rapport à la sortie du MR et l'orienter ainsi dans la direction de Super Kamiokande. Cette ligne utilise 28 aimants supraconducteurs à fonction combinée : ce sont à la fois des aimants dipolaires pour courber la trajectoire du faisceau, et des aimants quadripolaires pour le focaliser. Cette section fait 150 mètres de long (le rayon de courbure est de 104.4 mètres).

Enfin la partie *focalisation finale* change la direction du faisceau de  $3.64^\circ$  vers le bas. En effet, de par la courbure de la Terre, le faisceau doit être envoyé vers le sol pour arriver à Super-Kamiokande. Cette partie sert également à focaliser et à centrer le faisceau sur la cible. Ces opérations sont effectuées à l'aide d'aimants conventionnels.

## 5.2 Production des neutrinos

La ligne de faisceau secondaire que nous allons décrire dans cette section sert à la production du faisceau de neutrinos à partir du faisceau primaire de protons.

### La cible

La première étape consiste à produire par collision des protons sur une cible les particules secondaires ( $\pi^+$  et  $K^+$ ) qui se désintégreront ensuite en neutrinos et autres particules. Cette cible est soumise à des contraintes importantes lorsqu'elle est heurtée par un faisceau intense de protons :

- hausse de température importante à cause de la chaleur provenant des réactions
- dommages dûs à la radioactivité
- activation de la cible qui devient radioactive

Le choix du matériau utilisé pour cette cible est donc crucial. Il faut utiliser un matériau de faible numéro atomique (l'élévation de température due aux interactions est approximativement proportionnelle à ce numéro atomique), qui possède des températures de sublimation et fusion suffisamment élevées. Le seul matériau pouvant être utilisé est le carbone graphite.

Une autre contrainte concerne les dimensions : la cible doit être suffisamment large pour contenir tout le faisceau, mais suffisamment étroite pour laisser s'échapper les particules secondaires sans qu'elles réinteragissent dans la cible.

La cible de T2K est faite de graphite, de forme cylindrique, avec un diamètre de 26mm et une longueur de 90cm, ce qui correspond environ à deux longueurs de radiation. La cible est refroidie par de l'hélium gazeux, et placée dans la première corne. Une photo de cette cible sur son support est présentée dans la figure 5.2.

### Les cornes

Les particules secondaires produites sont focalisées par un système de cornes électromagnétiques. Une corne produit un champ magnétique en forme de tore qui permet de focaliser les particules ayant une charge électrique d'un certain signe et de défocaliser celles ayant la charge opposée. C'est ce système qui permet de passer d'un faisceau de neutrinos à un faisceau d'anti-neutrinos : l'une des polarités des cornes focalise les  $\pi^+$  qui se désintègrent en  $\nu_\mu$  ; l'autre polarité focalise les  $\pi^-$  qui se désintègrent en  $\bar{\nu}_\mu$ .



FIGURE 5.2 – La cible de T2K sur son support permettant l'insertion dans la première corne.

L'intérêt principal des cornes est qu'en focalisant les particules secondaires dans la direction du détecteur, elles augmentent le flux de neutrinos vers ce détecteur. La figure 5.3 [22] montre l'effet des cornes sur le flux de neutrinos arrivant au détecteur proche INGRID.

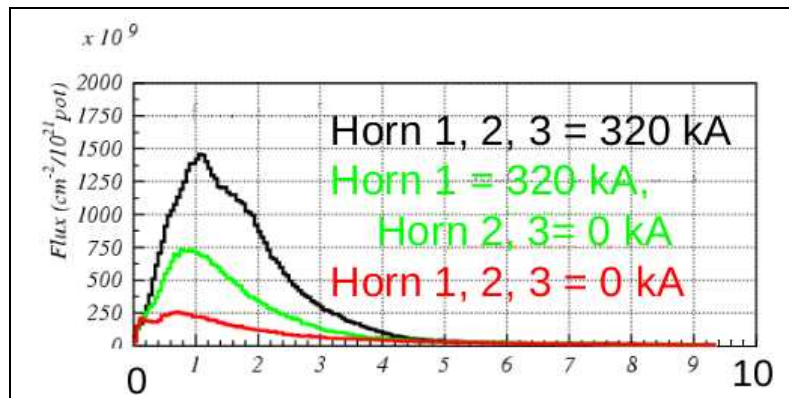


FIGURE 5.3 – Effet des cornes sur le flux de neutrino dans le détecteur proche INGRID. En rouge, sans aucune corne ; en vert en utilisant seulement la première corne et en noir lorsque toutes les cornes fonctionnent.

Une corne réduit généralement la distribution angulaire des particules du faisceau par un facteur 2. Pour obtenir une meilleure focalisation, il est possible d'utiliser plusieurs cornes en série. Néanmoins augmenter le nombre de cornes augmente également la proportion de pions qui sont réabsorbés dans la structure de ces cornes. Pour cette raison, les expériences se limitent généralement à 2 cornes.

Dans le cas de T2K, trois cornes sont utilisées. Néanmoins les deux premières cornes sont très proches l'une de l'autre, ce qui donne un système équivalent à un système à deux cornes. Ces cornes sont alimentées par un courant pulsé (synchronisé avec l'arrivée du faisceau) de 320 kA. L'ensemble du volume contenant la cible et les cornes est rempli d'hélium pour limiter la production de tritium et d'oxydes d'azote. Une vue schématique de l'ensemble est présentée en figure 5.4.

## Le tunnel de désintégration

Après avoir été focalisées par les cornes, les particules secondaires entrent dans le tunnel de désintégration où elles vont se désintégrer pour produire les neutrinos qui constitueront un faisceau. La longueur de ce tunnel résulte encore une fois d'un compromis : il doit être suffisamment long pour qu'un nombre important de pions se désintègrent, mais pas trop long pour éviter la désintégration des muons. Ceux-ci

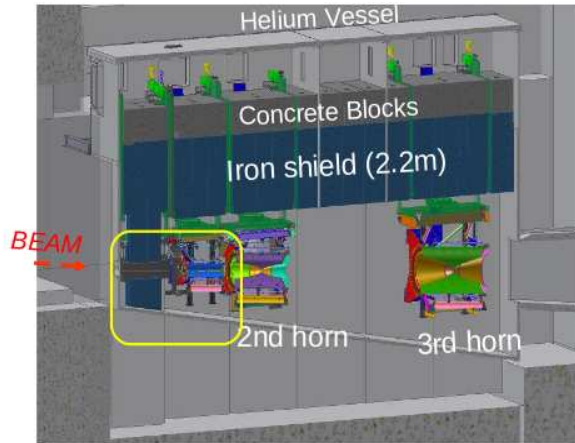


FIGURE 5.4 – Vue d’ensemble de la zone contenant la cible et les cornes. Encadrée en jaune, la première corne contenant la cible.

peuvent en effet donner la réaction  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$  qui augmente le bruit de fond pour l’apparition des neutrinos électroniques.

Le tunnel de désintégration de T2K fait environ 100 mètres de long et est également rempli d’hélium pour réduire l’absorption des pions. Il se termine par un gigantesque “beam dump”, composé de graphite, fer et cuivre qui sert à arrêter les hadrons encore présents dans le faisceau, ainsi que les muons d’énergie inférieure à 5 GeV. Les muons d’énergie supérieure le traversent, et seront détectés par le Muon Monitor pour contrôler la structure du faisceau.

### 5.3 Contrôle du faisceau

T2K repose sur le principe de l’expérience hors-axe. L’angle hors axe est déterminé par le centre du faisceau de neutrinos. Le faisceau a au premier ordre une forme gaussienne, nous allons considérer que sa direction est donnée par le maximum de cette gaussienne. Il est important de contrôler précisément sa position, ainsi que la largeur du faisceau. Au niveau de la ligne de faisceau neutrinos, les positions du faisceau de protons et des muons produits dans le tunnel de désintégration sont contrôlées par un ensemble de systèmes de mesure. Le faisceau de neutrinos muoniques quant à lui sera contrôlé dans le détecteur proche sur axe INGRID.

#### Durant l’accélération

La position et la taille du faisceau de protons sont régulièrement contrôlées le long de la ligne de faisceau neutrino, par trois types de détecteurs :

- les Electro Static Monitor (ESM) contrôlent sa position
- les Segmented Secondary Emission Monitor (SSEM) son profil
- les Current Transformer (CT) mesurent son intensité, c’est à dire le nombre de protons qu’il contient. C’est un paramètre important, les nombres d’interactions attendues dans les détecteurs ainsi que la sensibilité de l’expérience sont donnés en fonction du nombre de protons arrivant sur la cible
- enfin, les Beam Loss Monitors (BLM), qui sont des chambres à ionisation, mesurent les pertes lors du transport du faisceau.

## Le Muon monitor

Le Muon monitor (MuMon) est placé juste après le beam dump. Il détecte les muons de haute énergie (supérieure à 5 GeV) qui ont traversé le beam dump pour contrôler la position et l'intensité du faisceau. Il doit pouvoir déterminer la direction du faisceau avec une erreur inférieure à 0.25 mrad, et l'intensité avec une erreur inférieure à 3%. Enfin il doit effectuer une mesure pour chaque bouffée (chaque tir du faisceau est constitué de plusieurs paquets de protons séparés dans le temps appelés *bouffées*) du faisceau.

Il est constitué pour cela de deux détecteurs indépendants et redondants. Le premier est constitué de photodiodes à base de silicium, et le second de chambres à ionisation. Chaque détecteur est un quadrillage de  $7 \times 7$  éléments situés à 25 centimètres les uns des autres. La zone couverte est donc un carré de 1.50 mètres de côté.

## 5.4 Caractéristiques du faisceau

Le faisceau de neutrinos produit est un faisceau de  $\nu_\mu$  avec une contamination intrinsèque en  $\nu_e$  de l'ordre de 0.5% dans la direction du détecteur lointain SK, et une énergie moyenne de 800 MeV dans cette même direction. Intéressons nous à ses caractéristiques.

### Faisceau pulsé

Le faisceau produit n'est pas un faisceau continu, mais un faisceau pulsé : les neutrinos sont produits dans un court laps de temps, puis un certain temps s'écoule avant la bouffée suivante. Ce système présente deux avantages majeurs. Il permet tout d'abord de réduire le bruit de fond par coïncidence temporelle. En effet à partir du temps auquel le faisceau de protons atteint la cible, il est possible de calculer le temps auquel les neutrinos devraient atteindre le détecteur. En excluant les événements en dehors de cette fenêtre temporelle, il est possible d'exclure une partie importante des interactions ne provenant pas du faisceau de neutrinos (rayons cosmiques, neutrinos atmosphériques).

Les cornes fonctionnent avec un courant d'intensité élevé, et doivent donc être alimentées par un courant pulsé, ce qui signifie qu'elles ne peuvent pas être utilisées en continu mais uniquement périodiquement. Il faut donc également que les particules qu'elles doivent focaliser arrivent périodiquement.

### Structure du faisceau

Nous allons décrire ici la structure définitive du faisceau tel qu'il a été conçu en fonctionnement nominal. Il est à noter qu'au début de l'expérience il n'avait pas exactement cette structure.

Chaque tir du faisceau est constitué d'un ensemble de 8 bouffées, pour une durée totale de  $4.2\mu\text{s}$ . Chaque bouffée dure 60ns et a une énergie de 330 kJ (à l'intensité maximale). L'écart entre deux bouffées successives est de 581 ns. Un tir correspond à  $3.3 \times 10^{14}$  protons, et la période de répétition est de 3.5 secondes. L'ensemble donne un faisceau de 0.75MW. Cette puissance sera éventuellement portée à 4MW dans une deuxième phase de l'expérience.

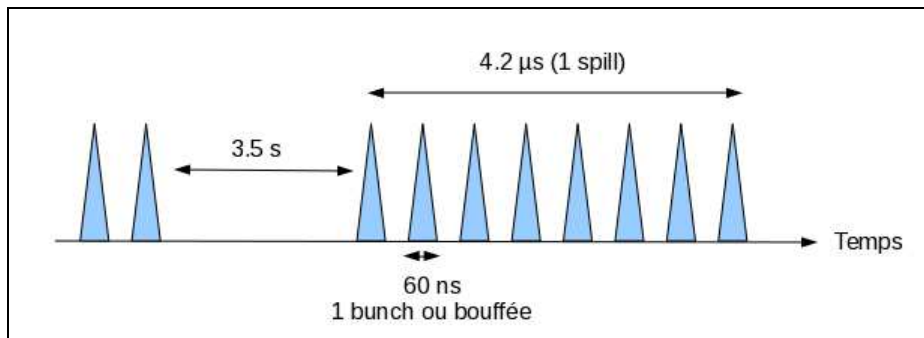


FIGURE 5.5 – Structure temporelle du faisceau. Chaque pic bleu correspond à une bouffée du faisceau.



FIGURE 5.6 – Vue aérienne de J-PARC.



## Chapitre 6

### Les détecteurs proches

Le faisceau de neutrinos produits dans le tunnel de désintégration arrive tout d'abord à un premier groupe de détecteurs, les détecteurs proches de l'expérience, qui vont mesurer un certain nombre de ses caractéristiques avant oscillation. Ils sont séparés en deux groupes : sur et hors axe, chaque groupe a des buts bien précis et de ce fait une structure très différente. Ils sont placés dans un puit en béton, de 17.5 m de diamètre et 37 m de profondeur environ, et situé à 280 mètres de la cible. L'ensemble des détecteurs proches dans le puit est représenté sur la figure 6.1.

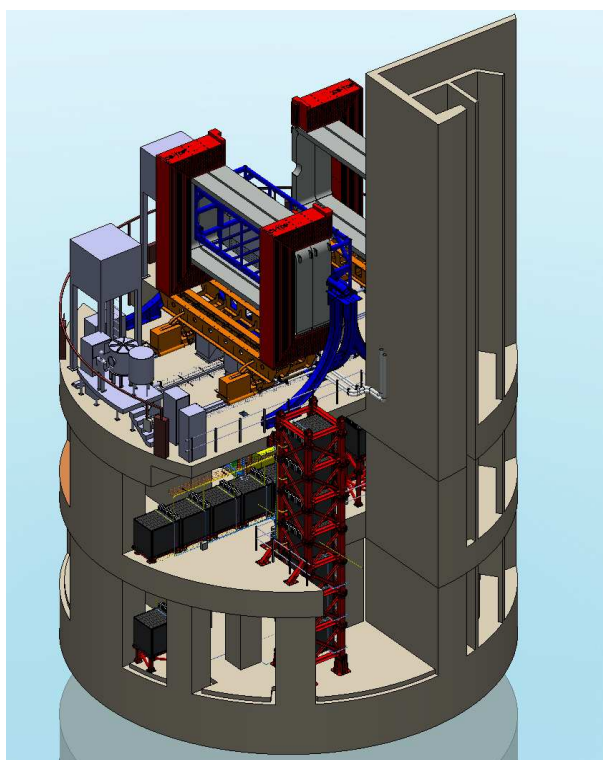


FIGURE 6.1 – Vue d'ensemble des détecteurs proches. En bas le détecteur sur axe INGRID, et dans la partie du haut l'ensemble des détecteurs hors-axe.

## 6.1 Détecteurs hors axe

Les détecteurs hors-axe sont placés dans la direction du détecteur lointain Super-Kamiokande, et servent à étudier le flux de neutrinos qui devrait y arriver. C'est une succession de détecteurs placés dans un champ magnétique.

### Objectifs

Le principe de T2K est de comparer les flux de neutrinos entre les détecteurs proches et lointain, plus précisément de prédire les flux de neutrinos au niveau du détecteur lointain en l'absence d'oscillations à partir des flux mesurés dans les détecteurs proches, et de comparer ces prédictions avec les véritables mesures à Super-Kamiokande pour en déduire les paramètres d'oscillation. Les détecteurs proches doivent donc réaliser un ensemble de mesures pour permettre une prédiction précise.

Les détecteurs hors-axe sont situés dans la direction de SK (mais avec des angles solides très différents), c'est donc à l'aide de ceux-ci qu'une grande partie de ces mesures sont effectuées. Ils doivent en particulier mesurer les spectres des  $\nu_\mu$  et des  $\nu_e$ , ainsi que s'intéresser aux sections efficaces de ces neutrinos. Plus précisément, ils doivent effectuer les mesures suivantes :

- à l'énergie des neutrinos utilisés, le processus d'interaction dominant est l'interaction quasi-élastique à courant chargé (CCQE),  $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$ . Les détecteurs hors-axe vont donc chercher à mesurer le produit flux multiplié par section efficace d'interaction pour ce type d'évènements
- d'autres types d'interactions se produisent également. Pour chacune d'entre elle, il faut mesurer le rapport entre leur section efficace et la section efficace des interactions CCQE, en fonction de l'énergie des neutrinos (la section efficace des CCQE est donc utilisée comme référence)
- certains types d'interactions constituent un bruit de fond notable pour les mesures que T2K cherche à effectuer. Il s'agit des interactions  $CC1\pi$  et  $NC\pi^+$  pour la disparition des  $\nu_\mu$  et de  $NC\pi^0$  pour l'apparition des  $\nu_e$ . Leurs sections efficaces doivent être déterminées aussi précisément que possible aux énergies du faisceau
- ces détecteurs doivent également mesurer la contamination intrinsèque du faisceau en  $\nu_e$  mentionnée précédemment car elle constitue un bruit de fond pour l'apparition des  $\nu_e$ .

### Aimant

Les détecteurs hors-axe sont magnétisés pour pouvoir déterminer le signe de la charge des particules. Pour cela l'aimant provenant de l'expérience UA1 du CERN est utilisé. Il a été précédemment utilisé par une autre expérience sur les neutrinos, NOMAD. Schématiquement, cet aimant est constitué de deux parties pouvant être écartées à l'aide d'un moteur (figure 6.2). Chaque partie est constituée de 8 éléments en forme de C, faites d'acier à faible taux de carbone pour contrôler la structure du champ magnétique. Les bobines sont placées à l'intérieur. Cela fournit un espace magnétisé en forme de parallélepède rectangle où les détecteurs seront installés.

Les dimensions de l'aimant sont  $7.6\text{m} \times 6.1\text{m} \times 5.6\text{m}$  pour un poids total de 850 tonnes. Le volume intérieur a pour dimension  $7\text{m} \times 3.6\text{m} \times 3.5\text{m}$ , ce qui signifie que le volume magnétisé disponible pour installer les détecteurs fait environ  $88\text{m}^3$ . Il existe des espaces dans la structure externe de l'aimant, qui seront utilisés pour placer des scintillateurs, constituant ainsi un détecteur, le SMRD, décrit dans les paragraphes suivants.

Cet aimant produit dans son volume intérieur un champ magnétique uniforme, horizontal et perpendiculaire à l'axe du faisceau de neutrinos. Les études préliminaires montrent une bonne uniformité du champ en intensité et en direction : dans l'essentiel du volume intérieur, la composante tangentielle du champ est inférieure à 1%, et les variations d'intensité inférieures à 2%. Dans T2K, il sera utilisé avec un courant de 3 kA, ce qui produit un champ magnétique de 0.2 T. Ce courant est différent de ce qui était utilisé dans les autres expériences effectuées à l'aide de cet aimant. Enfin les bobines sont constituées d'aluminium, et chauffent lors du fonctionnement, un système de refroidissement par eau sera donc utilisé.

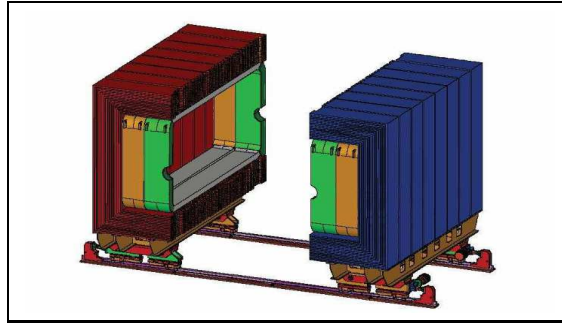


FIGURE 6.2 – L’aimant UA1, en position ouverte. En rouge et bleu la structure externe pour contrôler le flux, et en jaune et vert les bobines produisant le champ magnétique.

### Les différents détecteurs

Le ND280 est constitué de différents détecteurs, placés pour la plupart les uns à la suite des autres dans le volume intérieur de l’aimant. Le faisceau rencontre successivement le détecteur de  $\pi^0$ , puis le tracker et enfin le calorimètre électromagnétique. D’autres calorimètres sont installés autour de cette structure, et enfin le Side Muon Range Detector est placé dans la structure externe de l’aimant (figure 6.3).

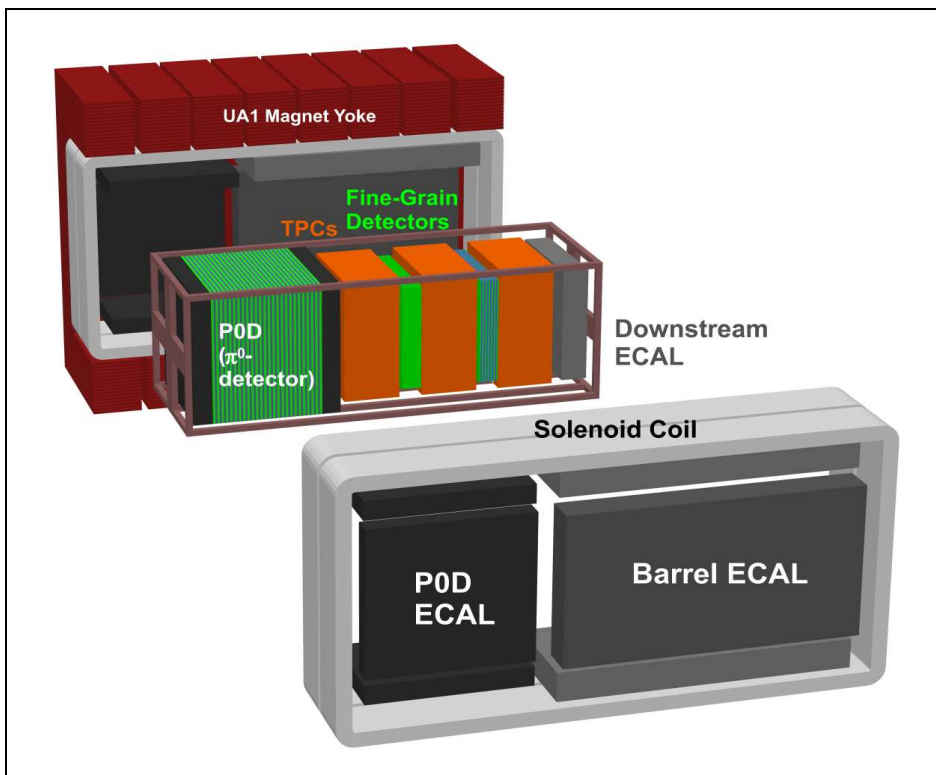


FIGURE 6.3 – Vue d’ensemble des détecteurs proches hors-axe

## Le détecteur de $\pi^0$

Le POD est conçu pour étudier la production de  $\pi^0$  dans l'eau qui constitue l'un des bruits de fond important à Super-Kamiokande pour l'apparition des  $\nu_e$ . Il est constitué de 3 modules successifs. Les deux modules externes servent de calorimètre électromagnétique, et la partie centrale constitue la cible pour les interactions neutrinos.

Les modules externes sont chacun constitués de 7 plans de scintillateurs horizontaux et verticaux, séparés par 4 millimètres de plomb. Le module central contient en plus des volumes contenant de l'eau. Il est constitué de 26 plans de scintillateurs horizontaux et verticaux, de 25 cibles constituées d'eau de 3 centimètres de long et de 25 feuilles de laiton de 1.6 millimètres d'épaisseur où les particules vont perdre de l'énergie. La masse d'eau présente est d'environ 2850 kilogrammes. L'ensemble est entouré d'un calorimètre électromagnétique pour mesurer l'énergie des photons quittant le détecteur. Les scintillateurs utilisés sont similaires à ceux de l'expérience MINERVA, de forme triangulaire (1.7mm de hauteur, base de 32.5mm).

La stratégie employée pour mesurer les sections efficaces de production des  $\pi^0$  sur l'oxygène consiste à prendre des données avec et sans eau. En comparant la production de  $\pi^0$  dans les deux cas, ces sections efficaces peuvent être déduites.

## Le "Tracker" ou trajectographe

Le "tracker" est placé juste après le POD. C'est dans cette partie que sont effectuées les mesures des flux et spectres en énergie des différentes saveurs de neutrino, à la fois des  $\nu_\mu$  pour prévoir le flux dans le détecteur lointain et des  $\nu_e$  pour connaître la contamination intrinsèque du faisceau. Il doit permettre d'identifier les différents types d'interaction neutrino pour les mesures de sections efficaces.

Ce détecteur est constitué d'une alternance de trois "Time Projection Chambers" (TPC) et deux Fine Grain Detectors (FGD). Les TPC permettent de reconstituer les trajectoires des particules en trois dimensions : deux coordonnées sont mesurées directement, la troisième est déduite du temps de propagation de l'information jusqu'au bord du détecteur. Ce sont des détecteurs avec une très bonne résolution spatiale, et très peu de matière arrêtant les particules. Ils permettent une reconstruction précises des trajectoires (et donc de l'impulsion des particules grâce à la courbure due au champ magnétique), et d'identifier les différents types de particules. Chaque TPC a une section carrée de 2.5m×2.5m pour une longueur de 90 centimètres.

Les FGD sont des détecteurs à base de scintillateurs. Les deux modules utilisés dans le détecteur sont différents : le premier n'est constitué que de scintillateurs et d'air. Il est constitué de 30 plans horizontaux et autant de plans verticaux. Le second contient également de l'eau pour servir de cible. Il est constitué de 7 plans horizontaux et 7 plans verticaux de scintillateurs, ainsi que de 6 épaisseurs de 3 centimètres d'eau. Les scintillateurs sont de dimensions 0.96cm×0.96cm×184.3cm.

Les FGD vont servir de cible pour le tracker, la masse de chacun d'entre eux est d'environ une tonne. Les particules parcourant une faible distance (tels que les protons dans les interactions CCQE) seront étudiées dans les FGD, alors que les TPC permettront de mesurer les impulsions et charges des autres particules.

## Le calorimètre électromagnétique

Un premier calorimètre électromagnétique entourait le POD. Un deuxième entoure le tracker : sur les côtés, en dessous, au dessus et en aval. Il sert à détecter et identifier les particules qui quittent le tracker. Il permet notamment de mesurer l'énergie des électrons provenant de l'interaction de  $\nu_e$  et des photons provenant de la désintégration d'un  $\pi^0$ .

Chaque module est constitué de 32 plans de scintillateurs (4 cm de large et 1 cm d'épaisseur) séparés par 31 couches de 1.75 mm de plomb, à l'exception du module en aval qui possède 34 plans de scintillateurs et 33 couches de plomb. D'après les études préliminaires, il devrait avoir une résolution en énergie de l'ordre de  $7.5\%/\sqrt{E}$  pour des énergies allant jusqu'à 5 GeV. Il devrait avoir aussi un bon pouvoir de séparation entre les électrons et les pions.

## Le Side Muon Range Detector

Le SMRD constitue le détecteur le plus externe du ND280. Il est constitué de scintillateurs placés dans les espaces entre les plaques de la structure externe de l'aimant (parties rouge et bleue de la figure 6.2). Il aura deux fonctions principales : il servira tout d'abord de veto pour les particules provenant de l'extérieur du détecteur (rayons cosmiques, interactions de neutrinos du faisceau à l'extérieur du détecteur). Il servira également à détecter les muons produits dans le tracker à grand angle et qui ne peuvent pas être correctement reconstruits par les TPC.

Pour la partie verticale, 5 plans de scintillateurs sont utilisés, et 4 pour les parties horizontales. L'épaisseur des scintillateurs est de 7mm.

## Performances visées

Pour réaliser les objectifs d'erreurs systématiques de T2K, les mesures dans les détecteurs hors-axe doivent être faites avec une bonne précision. Il faut notamment parvenir à une erreur inférieure à 10% sur le bruit de fond pour l'apparition des  $\nu_e$ , et inférieure à 5% pour le flux de neutrinos muoniques arrivant au détecteur lointain. Les énergies doivent être mesurées avec une précision meilleure que 2%, et l'on demande une précision de l'ordre de 5 à 10% pour le rapport entre les sections efficaces des autres interactions et la section efficace pour les interactions CCQE.

Le ND280 est donc un détecteur optimisé pour permettre une bonne reconstruction des événements plus que pour avoir une statistique importante. Cette précision est visible sur la reconstruction d'un événement complexe présentée en figure 6.4.

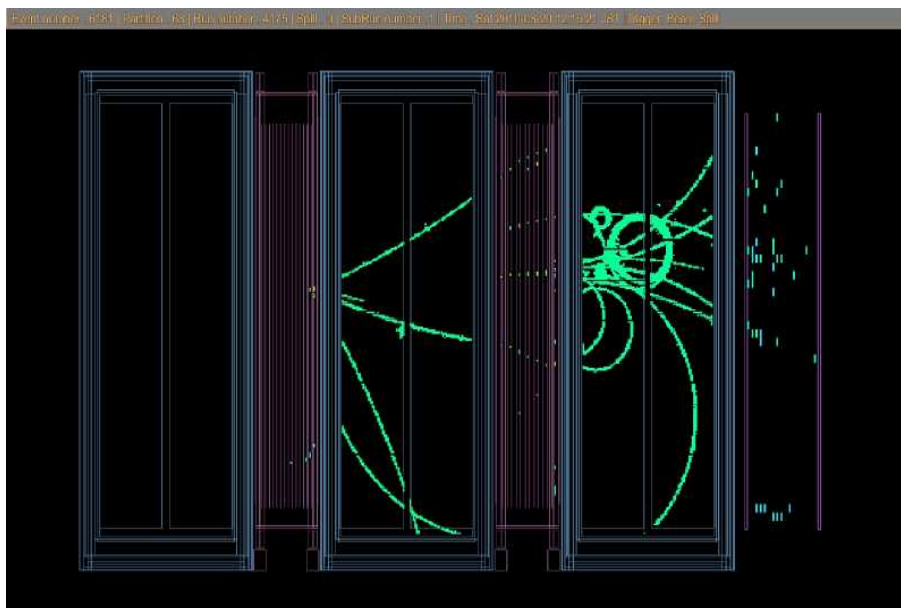


FIGURE 6.4 – Un événement neutrino détecté par les détecteurs proches hors-axe.

## 6.2 Le détecteur sur axe : INGRID

Le détecteur proche sur axe INGRID (Interactive Neutrino GRID) est l'objet principal de cette thèse. C'est un projet commun entre le LLR, chargé plus particulièrement de la conception mécanique et de la fabrication de la structure du détecteur, et l'université de Kyoto, responsable des scintillateurs et des objets associés (fibres notamment).

## Objectifs

Ce détecteur est construit sur l'axe pour contrôler le faisceau de neutrinos. Plusieurs mesures indirectes de contrôles sont effectuées (ligne de faisceau et Muon Monitor), en mesurant d'autres particules que les neutrinos. INGRID au contraire va étudier les caractéristiques du faisceau en mesurant directement les neutrinos muoniques.

L'objectif principal de ce détecteur est de mesurer précisément l'angle hors-axe entre la direction du faisceau et celle du détecteur lointain. Le spectre des neutrinos arrivant à Super-Kamiokande dépend fortement de la valeur de cet angle, pour réaliser les objectifs en terme d'erreur systématique de l'expérience, il doit être mesuré avec une précision meilleure que 1 milliradian. Pour effectuer cette mesure, INGRID va chercher à mesurer la position du centre du faisceau. Ce faisceau est en effet sensé avoir une forme gaussienne, et le principe de la mesure consiste à détecter la position des interactions des neutrinos, puis à effectuer un ajustement gaussien sur cette distribution pour en trouver le centre. Cette détermination sera étudiée plus en détails dans la partie *Analyse de données d'INGRID*. Cette mesure doit être effectuée quotidiennement, ce qui implique de concevoir un détecteur ayant une statistique suffisante.

INGRID permettra également d'étudier le profil dans le plan transverse du faisceau. Il est sensé avoir une symétrie cylindrique autour de son axe de propagation, ce qui devra être vérifié. Ensuite notre détecteur permettra également une comparaison avec le Monte Carlo du faisceau, notamment en permettant de mesurer le profil du faisceau perpendiculairement à son axe. La production de neutrinos est très difficile à simuler, pour deux raisons principales : il y a de fortes incertitudes sur les modèles d'interactions nucléaires décrivant la production des particules secondaires au niveau de la cible, et les sections efficaces des interactions de neutrinos sont assez mal connues. Un détecteur à forte statistique comme INGRID permettra donc un ajustement du Monte Carlo.

Enfin ce détecteur pourra permettre également une prédiction du nombre d'événements au niveau du détecteur lointain à partir du nombre d'événements qu'il détecte. Cette extrapolation sera faite principalement à partir des données des détecteurs proches hors axe, mais l'on peut également faire une prédiction à partir du détecteur proche sur axe.

Une première amélioration de ce détecteur a été réalisée en 2010 avec l'ajout d'un module supplémentaire, le Module Proton, qui devrait permettre d'étudier plus précisément les différents types d'interactions se produisant sur l'axe. La conception et l'analyse des données de ce détecteur font l'objet respectivement de la troisième et de la cinquième partie de cette thèse.

## Agencement du détecteur

Le détecteur INGRID est constitué d'un ensemble de seize modules identiques, constituant trois groupes : 7 modules constituent les modules horizontaux, 7 autres les modules verticaux, les deux derniers étant des modules hors croix. Schématiquement, les modules horizontaux servent à déterminer le centre du faisceau dans la direction horizontale, les modules verticaux ont le même rôle pour la direction verticale, et les modules hors croix servent à étudier la symétrie du faisceau.

Les modules verticaux et horizontaux forment une croix, et les modules hors croix sont placés au dessus et un peu avant les modules horizontaux, symétriquement par rapport aux modules verticaux (figure 6.5).

Les 7 modules horizontaux sont positionnés à l'étage -2 du puit. Il sont alignés perpendiculairement à la direction du faisceau, avec un pas régulier de 1.50 mètre entre les centres de deux modules successifs, ce qui laisse une zone morte au niveau de la détection de 30 centimètres entre deux modules.

Les modules verticaux sont alignés verticalement dans une tour partant de l'étage -3 du puit. Ils sont situés 4 mètres avant les modules horizontaux dans la direction du faisceau. Le centre du module central vertical est situé 18 centimètres plus haut que le centre des modules horizontaux, pour tenir compte de l'angle que fait le faisceau avec l'horizontale.

Les modules hors croix quant à eux sont également situés à l'étage -2, mais une structure de support les élève par rapport aux modules horizontaux. La distance horizontale entre leurs centres et les centres des modules horizontaux est de 1.50 mètres. Enfin ils sont placés au niveau des avant derniers modules

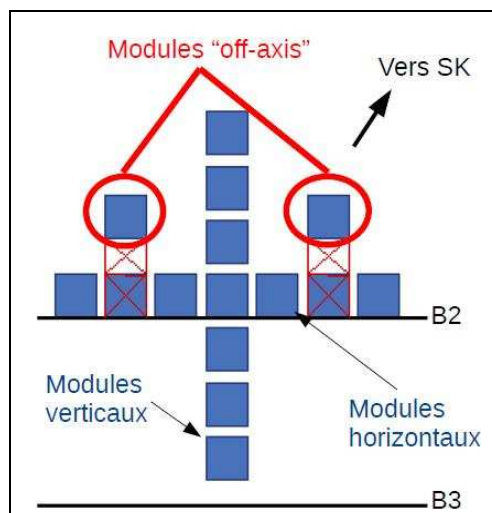


FIGURE 6.5 – Agencement des modules du détecteur INGRID, vus dans la direction du faisceau.

horizontaux de chaque côté, comme montré sur la figure 6.5.

Le détecteur avait été initialement conçu de façon à ce que le centre du faisceau dans sa configuration nominale passe au centre des modules centraux de la barre horizontale et de la barre verticale. Cependant, à cause d'un problème dans la construction du puit, ce n'est pas le cas pour les modules horizontaux. Il faudra tenir compte de ce problème lorsque l'on cherchera à déterminer la position du centre du faisceau. La position exacte du faisceau par rapport aux modules est présentée sur la figure 6.6.

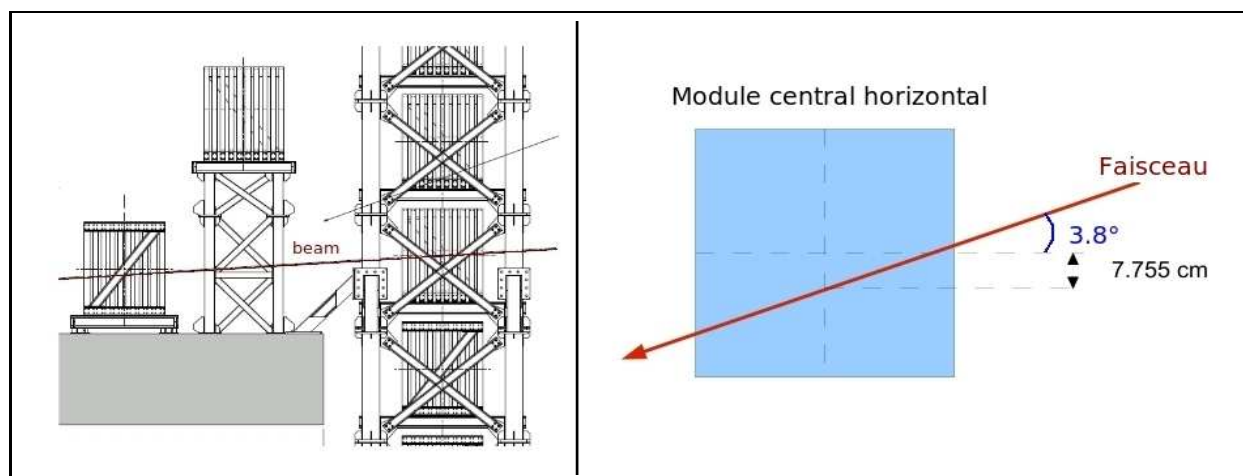


FIGURE 6.6 – Position des modules par rapport au centre théorique du faisceau.

## Structure d'un module

INGRID est constitué de 16 modules identiques, nous allons ici détailler la structure d'un tel module.

## Principe général

Les modules sont constitués de scintillateurs permettant la détection des particules chargées, et de fer qui constitue une cible dans laquelle les neutrinos pourront interagir, il faut en effet avoir une statistique importante pour pouvoir déterminer chaque jour la position du centre du faisceau et son profil dans le plan transverse. Les neutrinos peuvent également interagir dans les scintillateurs, mais plus de 95% des interactions ont lieu dans le fer.

Les scintillateurs sont organisés en plans. Un plan est fait de la juxtaposition de deux plans de scintillateurs, un premier de scintillateurs horizontaux qui permet la détermination de la position verticale, et un second de scintillateurs verticaux qui permet lui la détermination de la position horizontale. Ces deux plans sont collés ensemble dans une structure appelée plan de tracking (TKP).

Chaque module est constitué d'une alternance de 11 TKP et de 9 blocs de fer. Le design original comprenait 10 blocs de fer (un entre chaque couple de TKP), mais le dernier bloc de fer a finalement été retiré. En effet avec 10 blocs de fer, le poids du module aurait été trop élevé pour utiliser la grue disponible pour l'installation dans le puit. Pour la reconstruction des traces des particules dans INGRID, il faut que la particule traverse au moins 3 TKP, ce qui n'est pas possible pour une particule produite par une interaction dans le dernier bloc de fer, car il ne reste qu'un seul plan après ce bloc (sauf dans le cas particulier où elle part dans la direction opposée à celle du faisceau, mais ce n'est pas le cas le plus fréquent). Il a donc été décidé de retirer le dernier bloc de fer.

L'ensemble est entouré de plans véto, constitués d'une seule couche de scintillateurs, permettant de séparer les interactions se produisant à l'intérieur du module des particules produites à l'extérieur, comme par exemple les rayons cosmiques et les interactions neutrinos ayant lieu dans le sol. Une vue éclatée d'un module est présenté en figure 6.7

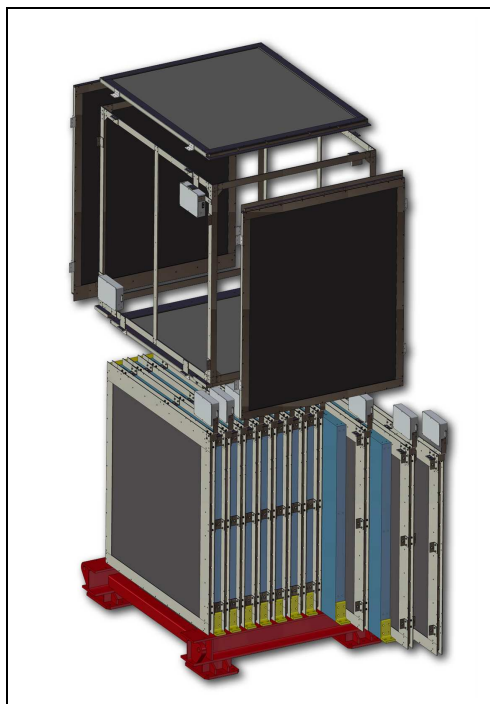


FIGURE 6.7 – Schéma d'un module d'INGRID

## Plans de tracking

Chaque plan de tracking permet de donner la position horizontale et verticale du passage de la particule. Ils sont donc composés de deux plans de scintillateurs, l'un vertical et l'autre horizontal. Chacun de ces



sous plans est constitué de 24 scintillateurs. Un TKP correspond donc à un total de 48 voies.

Les TKP sont conçus comme des structures autonomes, pouvant être testés séparément. Ils seront ensuite insérés dans la structure mécanique d'un module. La structure d'un TKP est constituée d'un cadre en aluminium. Les scintillateurs sont placés au milieu. L'isolation lumineuse de l'ensemble est réalisée à l'aide de feuilles de plastique noir et de mousse (figure 6.8).

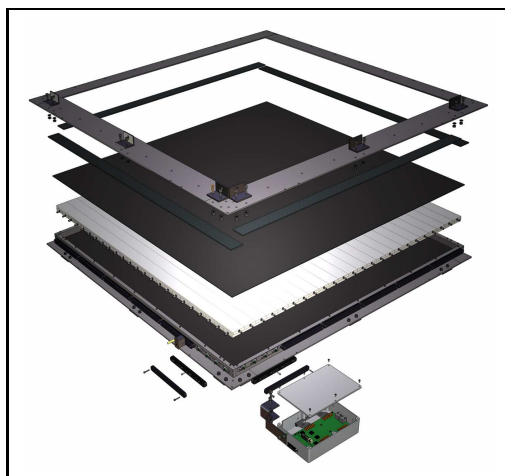


FIGURE 6.8 – Schéma éclaté d'un plan de tracking d'INGRID.

### Plans vétos

Pour pouvoir détecter les particules produites à l'extérieur du module (essentiellement des muons), ce dernier est entouré de plans de scintillateurs appelés plans vétos. Pour la face avant du module, c'est le premier TKP qui jouera ce rôle, il n'y a donc pas de structure supplémentaire de ce côté. Pour les côtés gauche, droit, le dessus et le dessous du module on utilise des plans vétos spécifiques. Ce sont des structures composées d'une seule couche de 22 scintillateurs, de même forme que les scintillateurs des TKP mais de longueurs différentes. Pour le plan veto du bas, à cause de la structure soutenant le module, des scintillateurs plus courts sont utilisés, alors que pour les autres plans vétos des scintillateurs plus longs sont utilisés pour maximiser la surface couverte.

Chaque module devrait donc être entouré de quatre plans vétos. Néanmoins, les plans vétos situés entre deux modules voisins sont mis en commun. Ainsi, à l'exception du premier module, les modules horizontaux n'ont pas de plan veto à droite mais utilisent le plan veto gauche de leur voisin. De même, à l'exception du module du bas, les modules verticaux n'ont pas de plan veto bas mais utilisent le plan veto du dessus du module situé juste en dessous d'eux. Les modules hors croix quant à eux possèdent quatre plans vétos.

### Scintillateurs

Différentes longueurs de scintillateurs sont utilisées, mais ils sont tous fabriqués sur le même principe, identique à celui des scintillateurs du détecteur SciBar de l'expérience K2K [23]. Ils ont été fabriqués au Fermi National Accelerator Laboratory, par extrusion. La matière pour la scintillation est du polystyrène contenant du PPO (1% de la masse) et du POPOP (0.03% de la masse). L'ensemble est isolé par une couche de réflecteur à base de dioxyde de titane.

Tous les scintillateurs ont une forme de parallépipède rectangle, avec une section rectangulaire de dimensions  $5 \times 1 \text{ cm}^2$ , mais des longueurs différentes :

- Les scintillateurs des TKP ont une longueur de 120.3 cm
- Les scintillateurs courts pour plans vétos ont une longueur de 111.9 cm
- Les scintillateurs longs pour plans vétos ont une longueur de 129.9 cm

## Cibles de fer

Les cibles de fer constituent l'essentiel de la masse du module, c'est donc là qu'auront lieu la plupart des interactions des neutrinos muons incidents. Un prototype de module INGRID testé dans l'expérience K2K avait permis de déterminer qu'il fallait mieux qu'elles ne soient pas trop épaisses [24]. Elles sont faites d'acier, de dimension  $120\text{ cm} \times 120\text{ cm} \times 6.5\text{ cm}$ , pour un poids de 785 kilogrammes. Le volume total d'acier dans un module est de  $0.9\text{ m}^3$ .

Il y avait une certaine tolérance sur la fabrication de ces plaques d'acier, et de ce fait elles ne pèsent pas toutes exactement le même poids. La masse totale de fer présente dans chaque module est indiquée dans la table 6.1. La masse totale d'acier est donc de 98844 kg pour les modules verticaux et horizontaux.

Numéro	0	1	2	3	4	5	6
Modules horizontaux	7124	7081	7065	7076	7059	7094	7114
Modules verticaux	7041	7063	7094	6987	7079	6979	6988

TABLE 6.1 – Masse totale (en kg) de fer présente dans chaque module. La valeur de conception est de 7065kg par module.

## Principe de détection

Le passage d'une particule chargée dans un scintillateur provoque l'émission de photons. La lumière produite est collectée par une fibre à décalage de longueur d'onde. La fibre transporte cette lumière jusqu'à l'extrémité du scintillateur vers un Multi Pixel Photon Counter (MPPC) qui la convertit en signal électrique, ensuite traité par l'électronique de l'expérience. Une première carte frontale (TFB) pour chaque plan traite le signal et l'envoie vers l'électronique du détecteur.

## Caractéristiques du détecteur INGRID

Le détecteur comprend un total de 9542 voies. Il a été conçu pour permettre de reconstituer toutes les 24 heures le profil du faisceau avec une bonne statistique, plus que pour pouvoir reconstruire précisément des événements. Il comprend donc des masses d'acier pour obtenir un grand nombre d'interactions. Ces plaques de fer absorbent rapidement la plupart des particules, et dans la plupart des cas seule la trajectoire des muons pourra être reconstruite. De même, il comporte un nombre de voies limité et des scintillateurs larges, ce qui lui donne une résolution spatiale moindre que les détecteurs du ND280. Ceci est visible sur la figure 6.9, qui montre un événement cosmique reconstruit dans un module.

L'avantage du détecteur est en revanche sa statistique. Il est tout d'abord placé sur l'axe du faisceau, là où le flux de neutrinos muons est le plus important, et est massif grâce aux plaques de fer, ce qui augmente la probabilité qu'un neutrino traversant le détecteur interagisse. Par exemple, dans les conditions de la première période de prise de mesures (run 2010a, jusqu'à l'été 2010), entre 1.4 et 1.7 interactions sont attendues dans INGRID pour  $10^{14}$  protons envoyés sur la cible, selon les modèles utilisés. La table 6.2 présente le détail de ce qui est attendu dans la première phase de prise de données [25].

## Construction et assemblage du détecteur

L'assemblage du détecteur a commencé en septembre 2008 à J-PARC. De par la conception modulaire du détecteur, la construction a pu être faite de façon séquentielle. Dans une première étape, les plans de tracking et les plans véto ont été assemblés et testés. Ensuite les modules horizontaux et verticaux ont été construits progressivement. Le premier module (module central horizontal) a été installé dans le puit le 12 mars 2009. L'installation des modules horizontaux s'est achevée le 16 juillet 2009, et celle des modules verticaux le 11 août. L'installation des modules hors croix a eu lieu un an plus tard. Pour la première

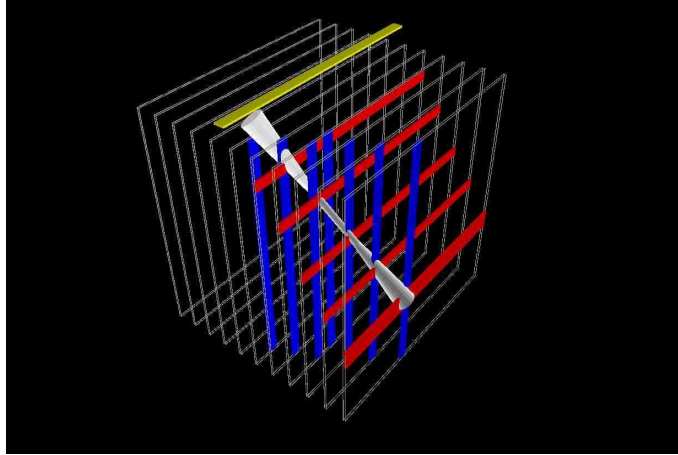


FIGURE 6.9 – Un évènement cosmique dans un module INGRID. Les barres colorées montrent les scintillateurs activés : horizontaux en rouge, verticaux en bleu et veto en jaune. La trace reconstruite correspond au tube gris.

Numéro	0	1	2	3	4	5	6
Horizontaux	$7.062 \times 10^5$	$9.456 \times 10^5$	$1.134 \times 10^6$	$1.177 \times 10^6$	$1.133 \times 10^6$	$9.399 \times 10^5$	$7.022 \times 10^5$
Verticaux	$7.739 \times 10^5$	$1.007 \times 10^6$	$1.181 \times 10^6$	$1.240 \times 10^6$	$1.161 \times 10^6$	$9.868 \times 10^5$	$7.473 \times 10^5$

TABLE 6.2 – Nombres d'évènements  $\nu_\mu$  attendu par module pour  $10^{21}$  protons sur cible (un an de prise de données à pleine intensité), dans les conditions de la première période de prise de mesure (Courant des cornes de 250 kA). Le modèle utilisé est FLUKA2008 pour les interactions hadroniques dans la cible.

année de prise de données, seuls les modules horizontaux et verticaux étaient opérationnels. Des photos de la phase d'assemblage et d'installation sont présentées dans l'annexe E.

INGRID a détecté le premier évènement neutrino de l'expérience T2K le 22 novembre 2009 à 20h25 (figure 6.10), ce qui a fait l'objet d'un communiqué de presse de la part des laboratoires japonais KEK et J-PARC.

Les modules supplémentaires, hors croix et Module Proton, ont été installés après la fin de la première période de prise de données à l'été 2010, et le détecteur INGRID était complètement assemblé et installé dans le puit en novembre 2010, prêt pour la nouvelle période de prise de données (run 2010b) qui a débuté à la mi-novembre 2010.

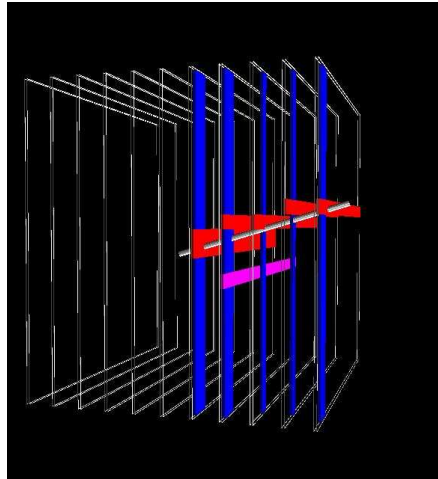


FIGURE 6.10 – Le premier évènement neutrino de l'expérience T2K, détecté par INGRID.

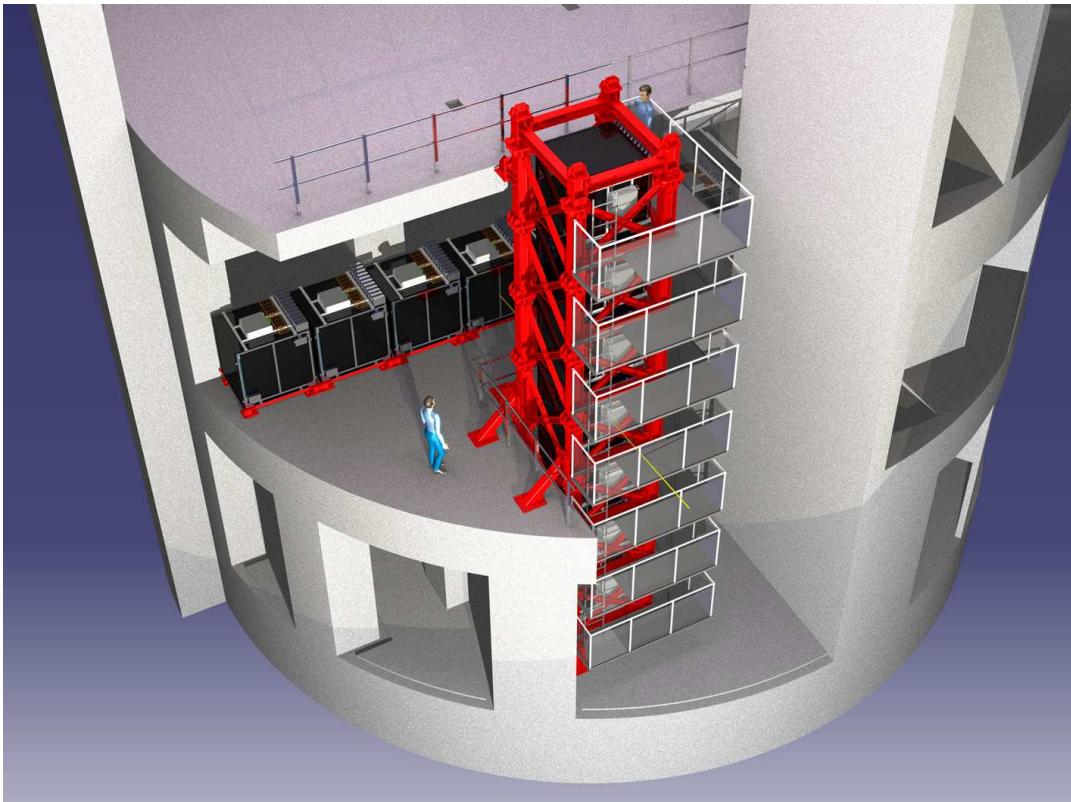


FIGURE 6.11 – Vue du détecteur INGRID dans le puit du ND280.