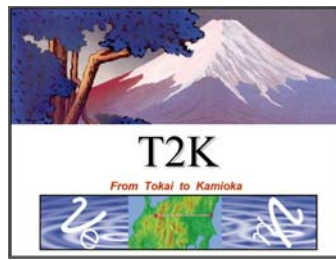


Rapport d'activité 2004-2007 du groupe T2K



Un détecteur de neutrinos placé au fond d'une mine d'or du Dakota du Sud à la fin des années 1960 a mis en évidence un net déficit entre le flux de neutrinos solaires détectés et le flux prédit par les modèles solaires. Ces résultats ont été confirmés par une série d'expériences sur les neutrinos solaires dont l'expérience Super-Kamiokande au Japon. Cette expérience a observé en 1998 une nette variation du flux de neutrinos atmosphériques en fonction de l'angle zénithal des neutrinos (prix Nobel 2002 à Masatoshi Koshiba et Robert Davis). Ceci a permis de conforter d'une part l'interprétation des déficits observés précédemment en termes d'oscillation de neutrinos et d'autre part l'hypothèse que ces particules possèdent une masse.

Les expériences d'oscillation de neutrinos à venir visent à renforcer l'interprétation du changement de saveur des neutrinos dans le mécanisme d'oscillation quantique tout en déterminant le plus précisément possible les paramètres de la matrice de mélange, les angles $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ et la phase de Dirac δ , ainsi que les deux différences de masses carrées Δm_{12}^2 et Δm_{23}^2 , et le signe de ces dernières. Ces paramètres font partie des vingt-sept paramètres du modèle standard de la physique des particules élémentaires au même titre que, par exemple, la masse du boson de Higgs ou l'angle de mélange de la théorie électrofaible. Il est à noter que la phase de Dirac δ des neutrinos offre la possibilité de mesurer la symétrie matière – antimatière dans le secteur des leptons.

Au Japon, la future expérience T2K entre l'accélérateur JPARC, un synchrotron à protons de 40 GeV à Tokaï, et le détecteur Super-Kamiokande situé à 295 km est en cours de construction et doit prendre ses premières données en avril 2009. Son objectif est d'observer pour la première fois une disparition de saveur, les neutrinos muons, avec une apparition de saveur, les neutrinos électrons, et de mesurer précisément l'angle θ_{13} . Il s'agit ainsi d'observer en détail un mécanisme d'oscillation quantique sur une distance de près de 295 km ! Le potentiel de découverte de T2K en physique des particules élémentaires est très important.

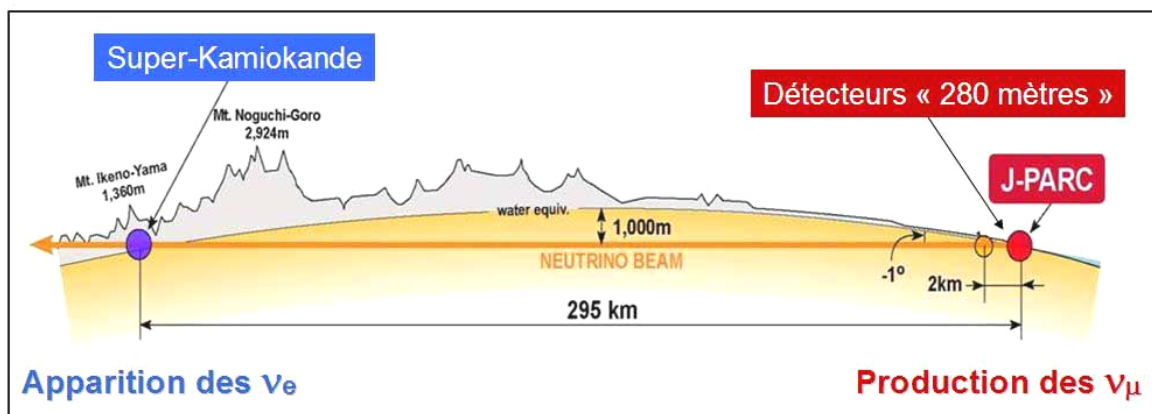


Figure 1. Production et détection des neutrinos dans l'expérience T2K

Notre expérience T2K sera une expérience « hors axe », une première au monde. Les neutrinos produits par JPARC et détectés dans Super-Kamiokande seront émis à un angle de 2.5 degré par rapport à l'axe principal de désintégration en neutrinos des pions primaires. Ce type de configuration expérimentale permet une sélection assez fine de la gamme d'énergie des neutrinos produits, environ 800 MeV, et une réduction significative du bruit de fond en neutrinos électrons. La probabilité d'apparition des neutrinos électrons par le mécanisme d'oscillation quantique sera ainsi maximale pour une distance correspondant à celle séparant Super-Kamiokande de JPARC. Un ensemble de détecteurs « proches » situés au fond d'un puits à 280 mètres du point de production des pions primaires mesurera le flux, la géométrie et la composition en bruit de fond du faisceau de neutrinos muons. Son rôle sera aussi de réduire l'ensemble des erreurs systématiques des mesures du détecteur lointain Super-Kamiokande et d'améliorer la sensibilité de l'expérience pour les mesures de l'angle de mélange θ_{13} . Une attention spéciale sera portée aux incertitudes liées à l'extrapolation des résultats de l'ensemble des détecteurs proches au détecteur lointain Super-Kamiokande. La normalisation relative des détecteurs proches et du détecteur lointain est en effet la clef de voûte de l'expérience T2K.

Pour une expérience « hors axe », les mesures en permanence de l'angle d'émission des neutrinos et leur distribution dans le plan transverse sont absolument capitales. Cela constitue l'objectif principal du détecteur INGRID (figure 2) situé au fond du puits « proche » à zéro degré sur l'axe principal de désintégration des pions produits 280 mètres en amont. Notre laboratoire concentre principalement ses efforts sur ce projet. Le taux de comptage en neutrinos muons attendus dans INGRID nous donnera la possibilité de suivre et de vérifier la bonne direction du faisceau toutes les vingt-quatre heures et de corriger si nécessaire les paramètres de l'accélérateur de protons. Notre objectif est de mesurer l'angle d'émission du faisceau de neutrinos avec une précision de l'ordre de 1 mrd.



Figure 2. Le détecteur INGRID et le puits « 280 mètres »

Un autre objectif d'INGRID sera de mesurer le flux absolu de neutrinos muons et de comparer les résultats avec ceux obtenus par les autres détecteurs « proches » situés non pas sur l'axe principal mais à un angle de 2.5 degré dans la direction de Super-Kamiokande. Le détecteur INGRID est à la fois essentiel à la mise en route de la ligne de faisceau neutrinos et au fonctionnement et à l'analyse des données de l'expérience T2K. Ceci implique la mise en place impérative du détecteur et de son bon fonctionnement au plus tard pour avril 2009.

Le détecteur INGRID comprend 16 modules identiques représentés dans le puits « 280 mètres » sur la figure 2. Parmi eux, quatorze seront distribués en croix dans le plan transverse au faisceau pour la mesure précise du zéro degré suivant les axes x et y, alors que deux seront positionnés hors axes pour un contrôle à deux dimensions du profil du faisceau. Chaque module détectera le flux de neutrinos grâce aux muons (et éventuellement protons) de recul qui seront produits lors d'une interaction faible entre les neutrinos incidents et une série de « cibles » constituées de plaques de fer. La trajectographie et l'identification du muon de recul seront obtenues par un ensemble de paires de plans de scintillateurs en x et y alternées avec le fer. Le signal de lumière émis par chaque scintillateur sera d'abord guidé par une fibre optique et ensuite collecté par un nouveau type de détecteur de photons à pixels de silicium MPPC mis au point très récemment en Japon. Nous avons déjà souligné l'importance du détecteur INGRID au sein de l'expérience T2K. Il sera en particulier le premier détecteur de la collaboration T2K à « voir » et à mesurer les neutrinos produits par le nouvel accélérateur de protons de JPARC.

Le groupe T2K de notre laboratoire s'est formé récemment suite à l'acceptation du projet INGRID par l'IN2P3 durant l'été 2006. Nous avons rejoint formellement la collaboration T2K en novembre de la même année. Le financement français du projet INGRID s'étale sur trois ans : 2007, 2008 et 2009. Son montant correspond environ à 80% du coût total du détecteur. La durée de la prise des données de la phase 1 du projet neutrinos de JPARC va s'étaler sur 6 ans à compter d'avril 2009. Les responsabilités du projet sont partagées entre le groupe japonais de l'université de Kyoto et le groupe T2K de notre laboratoire. Nous bénéficions au sein de l'IN2P3 du soutien d'un groupe neutrinos de l'IPN de Lyon pour les simulations de bruit de fond dans le puits.

Les contributions du laboratoire

Notre laboratoire contribue très significativement dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Kyoto à la conception, réalisation, installation et futur fonctionnement du détecteur INGRID.

Mécanique

Notre laboratoire a pris en charge la responsabilité de l'ensemble des aspects mécaniques du détecteur. Cela comprend tout d'abord la conception et la réalisation des seize modules identiques et de leurs supports métalliques. Chaque module sera constitué dans sa partie passive de dix plans de fer d'un volume individuel de $100 \times 100 \times 6.5 \text{ cm}^3$. Le poids total d'un module sera de plus de 7 tonnes. Il faut noter que la tour verticale composée de sept modules (figure 2) doit atteindre une hauteur totale d'environ douze mètres. Le LLR assure ensuite les études de conception des plans de trajectographie (figure 3). Ils constituent la partie active du module réparti en onze plans composés chacun de 24+24 scintillateurs mesurant la direction en x et en y des muons de recul. D'ici la fin de cette année (2008), nous aurons fabriqué dans notre atelier un prototype d'un plan complet de trajectographie. Les interfaces entre la mécanique et l'électronique frontale de lecture des plans sont également sous la responsabilité de notre groupe. Nous réfléchissons dès à présent aux procédures

d'intégration des modules en surface sur le site de JPARC et de leur installation au fond du puits « 280 mètres » prévues pour janvier-février 2009. Toutes les études mécaniques du détecteur doivent satisfaire d'une façon générale nos contraintes financières, respecter les normes sismiques sévères du Japon et tenir compte du peu d'espace disponible dans le puits pour l'installation et la maintenance du détecteur.

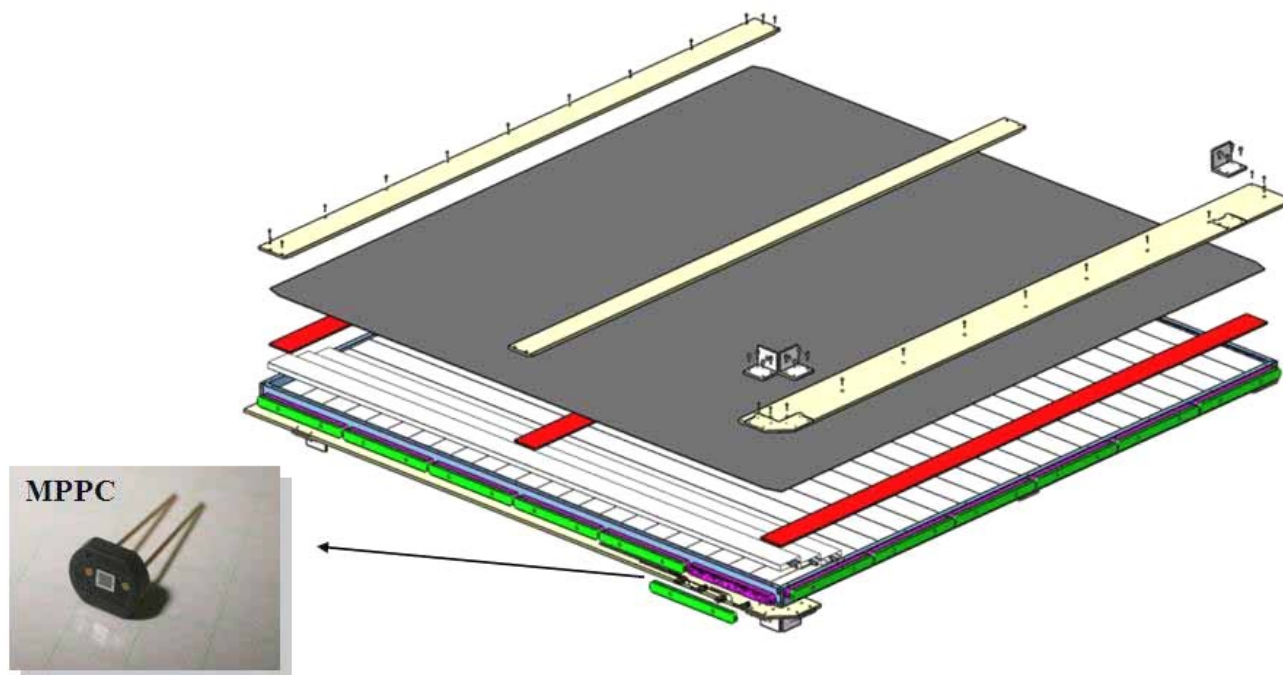


Figure 3. Conception d'un plan de scintillateurs

Détecteurs de photons

La détection de la lumière émise par les scintillateurs est obtenue grâce aux nouveaux détecteurs « Multi Pixels Photons Detector » (MPPC) mis au point par Hamamatsu pour les besoins de l'expérience T2K (figure 3). Chaque scintillateur sera associé à un unique MPPC qui collectera les photons sur une surface de $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ composée de 664 pixels en silicium. Le nombre total de détecteurs de photons nécessaires pour les seize modules d'INGRID est de l'ordre de 10000. Notre laboratoire est responsable de l'achat et de la qualification de 5000 d'entre eux, l'autre moitié étant à la charge de l'université de Kyoto. Pour satisfaire cet engagement, la conception et la mise en place au LLR d'un banc de tests sont prévues pour la fin du printemps 2008. Nous anticipons une durée d'environ trois mois pour la réception et la qualification des détecteurs de photons. Notre laboratoire développe, en vue du stockage important des données des 10000 MPPC, une base de données commune au LLR et à l'université de Kyoto. Cette base de données sera également accessible depuis JPARC pour l'installation, le fonctionnement et la maintenance d'INGRID.

Alimentations

Nous avons en charge les études et la production du système d'alimentation des hautes et basses tensions du détecteur INGRID. Cela correspond d'une part à l'alimentation des 190 cartes de l'électronique frontale développée par nos collègues anglais de l'Imperial College et d'autre part à la mise sous tension des 10000 MPPC de Hamamatsu. Nous allons également contribuer à la conception des outils de contrôle par ordinateur de ce système, effectué localement ou depuis la France.

Simulation et reconstruction

Notre contribution dans ce domaine d'activité a été en premier lieu d'installer au laboratoire, en les développant significativement, les programmes de simulations T2K. Nous avons ainsi pu proposer à la collaboration, grâce à nos analyses, la version finale de la géométrie des modules en tenant compte des contraintes mécaniques étudiées parallèlement par notre groupe. Nos objectifs de physique furent d'améliorer l'efficacité de détection des neutrinos muons et d'obtenir une meilleure uniformité entre les seize modules. En effet, la précision voulue sur la mesure du zéro degré pour l'angle d'émission des neutrinos nous impose d'avoir des modules rigoureusement identiques. Le travail actuellement en cours porte essentiellement sur les méthodes de trajectographie nécessaire pour identifier la plaque de fer dans laquelle a eu lieu l'interaction faible, pour reconstruire et identifier la trace du muon de recul et mesurer son angle d'émission par rapport à la direction incidente du neutrino. Une bonne précision sur cette dernière information est essentielle car elle permet de sélectionner des gammes d'énergie des neutrinos muons incidents. Nous considérons principalement les voies quasi-élastiques avec courant chargé sans négliger pour autant la possibilité de mesurer les interactions pour certaines voies inélastiques. Nous allons par ailleurs nous impliquer prochainement dans l'analyse des données du détecteur Super-Kamiokande. En attendant les premiers faisceaux de JPARC, nous allons nous familiariser avec le détecteur lointain en étudiant les données atmosphériques de la collaboration Super-Kamiokande.

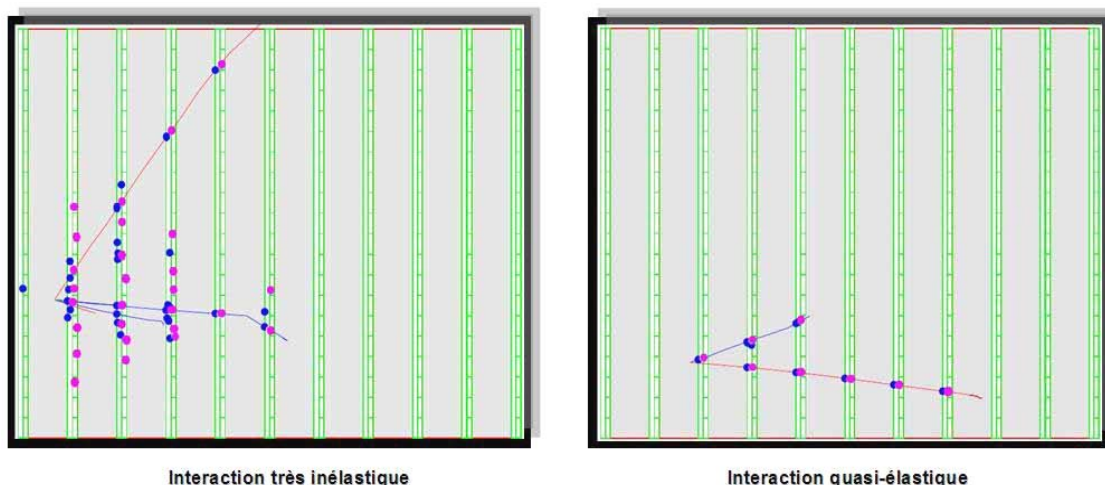


Figure 4. Simulations d'interactions faibles de neutrinos incidents (par la gauche) avec des plaques de fer d'un module.

Responsabilités LLR dans T2K

Oscar Ferreira est membre du « technical board » de T2K. Michel Gonin est « convener » de T2K et partage la responsabilité du détecteur INGRID avec T. Nakaya de l'université de Kyoto.

Calendrier et perspectives

Les premières prises de données sont prévues pour avril 2009. La mise en évidence de « l'apparition » des neutrinos électrons et la mesure de l'angle de mélange θ_{13} doit prendre 5 à 6 ans, correspondant à la phase 1 du projet neutrinos de JPARC. Cette mesure va contribuer à établir un futur programme d'études de la violation CP pour les leptons, sujet très important qui traite du problème de l'asymétrie matière-antimatière de notre univers. Cela constitue la phase 2 de JPARC et implique un projet ambitieux de construction de nouveaux détecteurs « proches » situés à 2 kilomètres du point de production des neutrinos dans la direction de Super-Kamiokande. Au-delà de 2020, la phase 3 du projet devrait inclure la construction d'un nouveau gigantesque détecteur lointain, Hyper-Kamiokande, d'un volume très largement supérieur à celui de Super-Kamiokande.

Equipe de recherche T2K au LLR

Physiciens: Olivier Drapier, Michel Gonin (responsable), François Jacquet, François Moreau.

Doctorant: Phuong Dinh Tran.

Ingénieurs: Simon Chollet, Alain Debraine, Yannick Geerbeart, Oscar Ferreira, Jean-Charles Vanel.