



énergie atomique • énergies alternatives



L'expérience T2K

et mon travail de première année

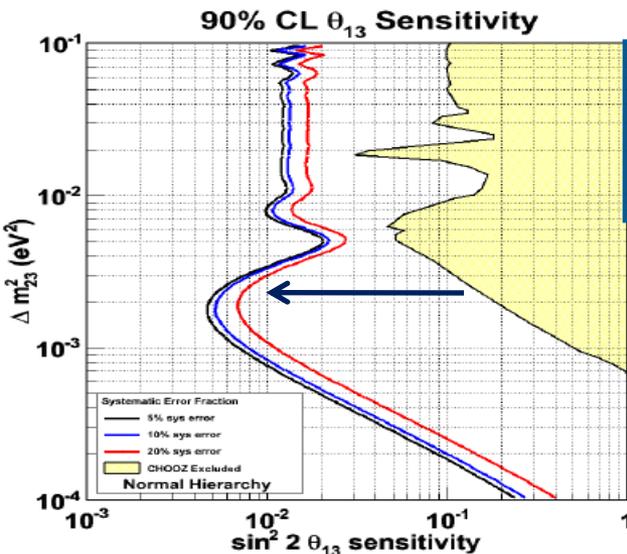
MACAIRE Michaël
CEA-Saclay – IPN Lyon

- La preuve expérimentale que les neutrinos sont massifs est un signe de physique au-delà du modèle standard
- **Etats propres d'interaction** (ν_e, ν_μ, ν_τ) \neq **Etats propres de masse** (ν_1, ν_2, ν_3)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\delta_3} \end{pmatrix}$$

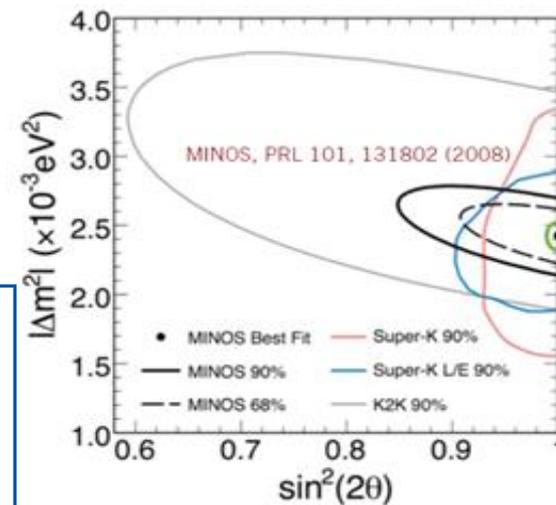
avec $s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$, $c_{ij} = \cos(\theta_{ij})$, θ_{ij} = angle de mélange

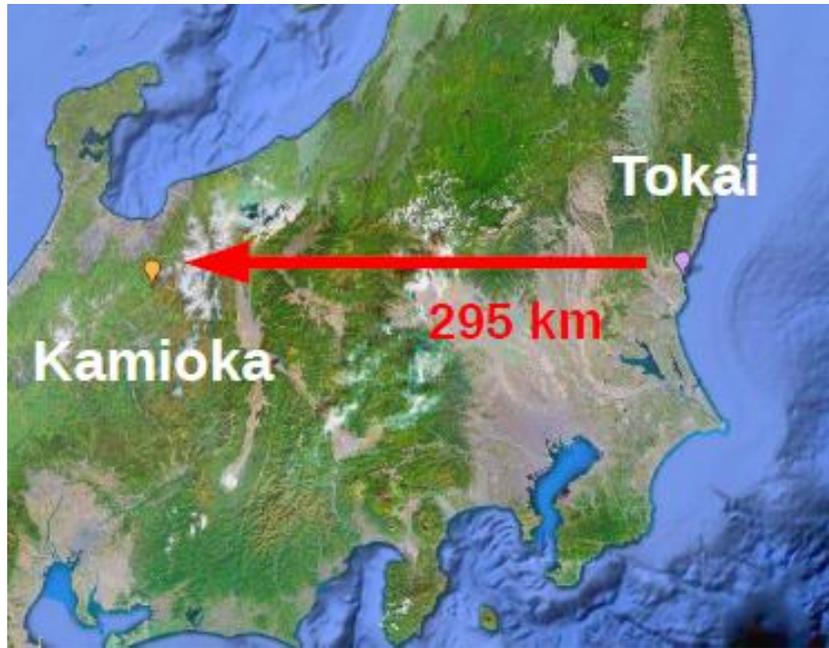
L'expérience T2K propose d'améliorer notre connaissance sur 2 des paramètres de cette matrice :



θ_{13} : dont on ne connaît qu'une limite supérieure
T2K : $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$ (10x mieux)

θ_{23} : dont la valeur n'est pas connue précisément
T2K : $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \sim 0.01$,
 $(\delta(\Delta m^2_{23}) < 1.10^{-4} \text{ eV}^2)$





Expérience d'oscillation longue distance :

- > **Faisceau de ν_μ** : produit à **JPARC** (Tokai)
 - Production par collisions de protons de 30 GeV sur une cible de carbone
 - Puissance nominale 0.75 MW

- > **Détecteur proche** : **ND280** à 280 mètres
 - Caractérisation du faisceau avant oscillation

- > **Détecteur lointain** : **Super Kamiokande** situé à 295 km de JPARC

Objectifs de T2K :

- **Disparition de ν_μ** (*amélioration des mesures Δm^2_{23} et θ_{23}*) :

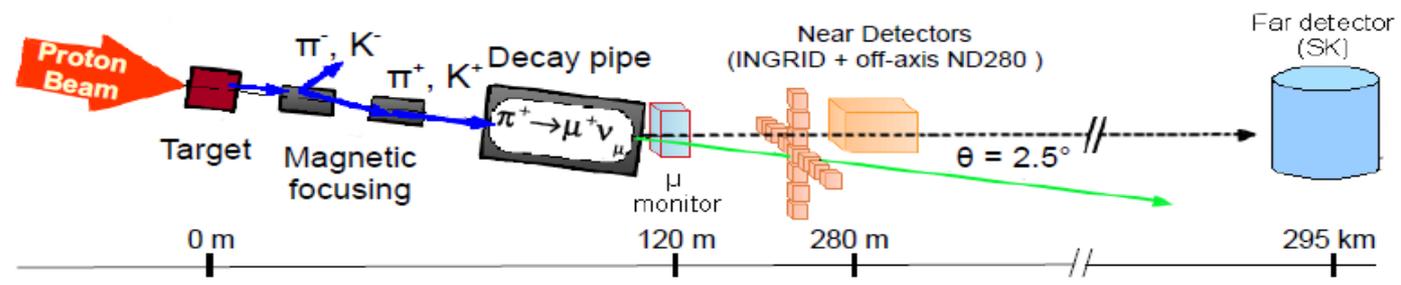
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2(1.27 \Delta m^2_{23} L/E)$$

- **Apparition de ν_e** (*mesure/amélioration de la limite de θ_{13}*) :

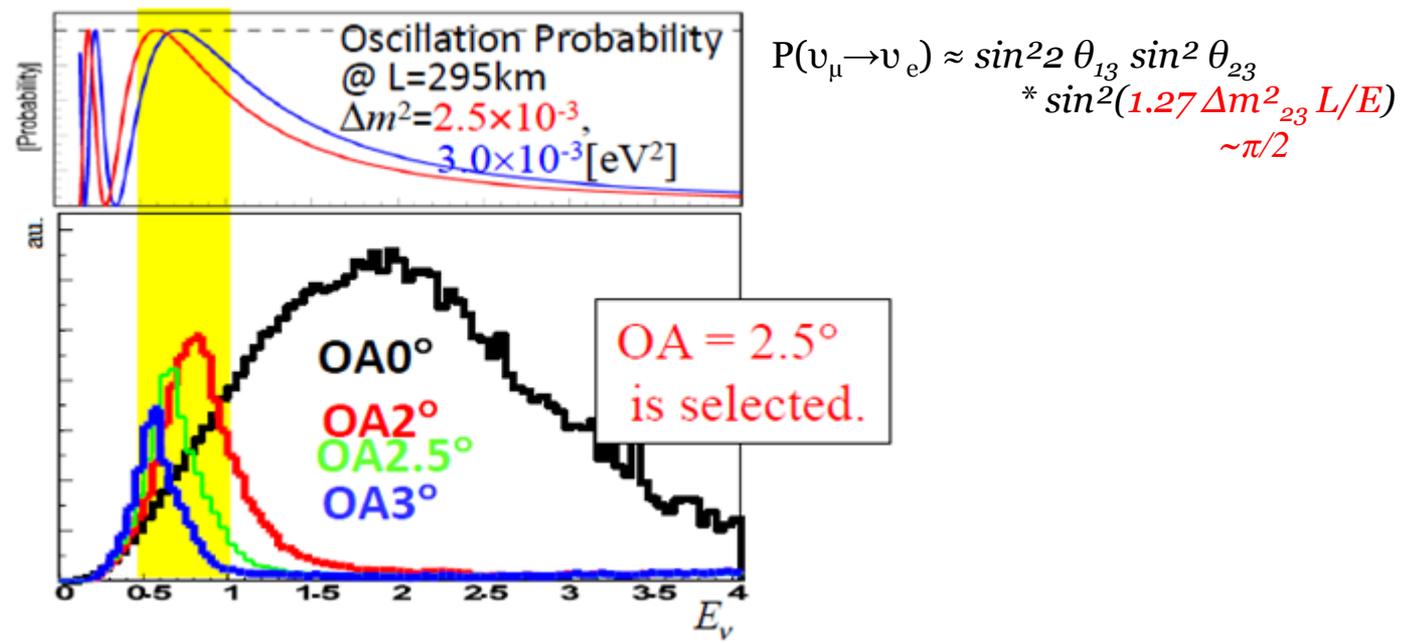
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2(1.27 \Delta m^2_{23} L/E) (+ f(\theta_{13}, \delta, \Delta m^2, \dots))$$

Si $\theta_{13} \neq 0$: Possibilité de phénomènes de violation de CP dans le secteur leptonique
 (conséquence dans la leptogénèse – asymétrie matière/antimatière)

- T2K est la première expérience faisceau « hors-axe » (off-axis)

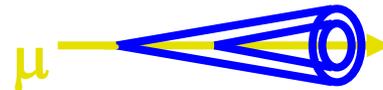
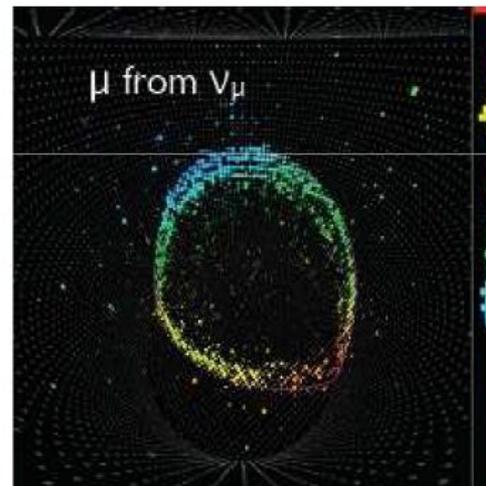
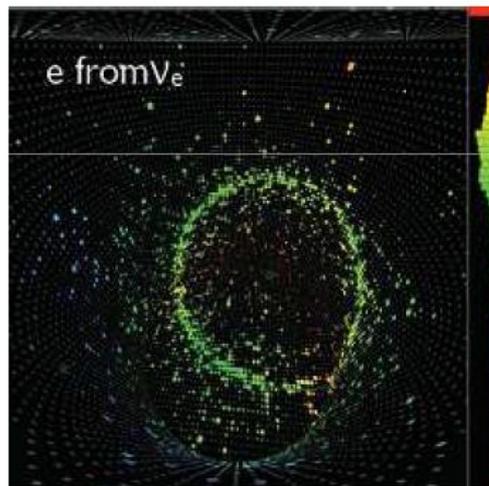
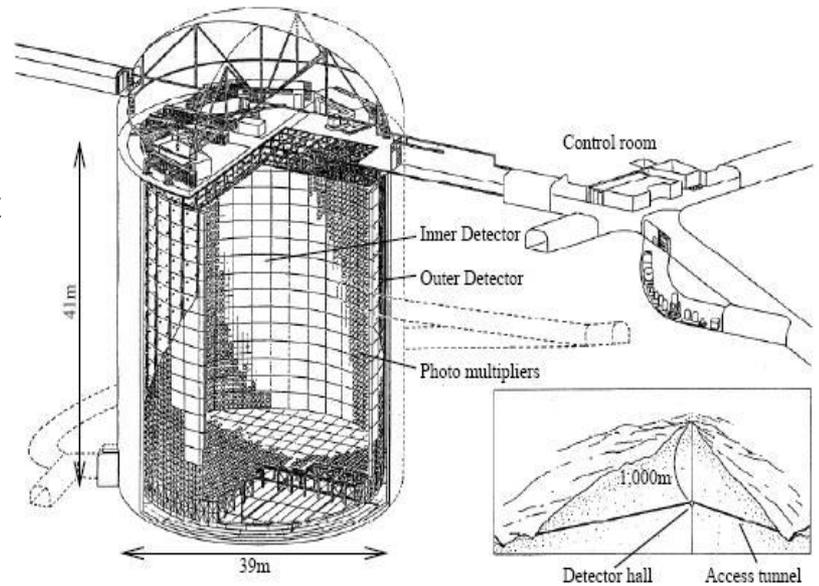


- Permet d'obtenir un spectre en énergie étroit, choisi pour se placer à un maximum d'oscillation



T2K *Le détecteur lointain : Super Kamiokande*

- Le détecteur lointain de T2K est le détecteur Super Kamiokande.
- Détecteur de forme cylindrique de 40m de haut et de diamètre rempli d'eau pure, situé sous 1km de roche
- Composé d'~11000 photomultiplicateurs pour détecter la lumière Tcherenkov créée par les interactions de neutrinos
- Très bonne séparation e/μ



- Localisé à **280 mètres** de la cible, situé hors-axe de $2,5^\circ$

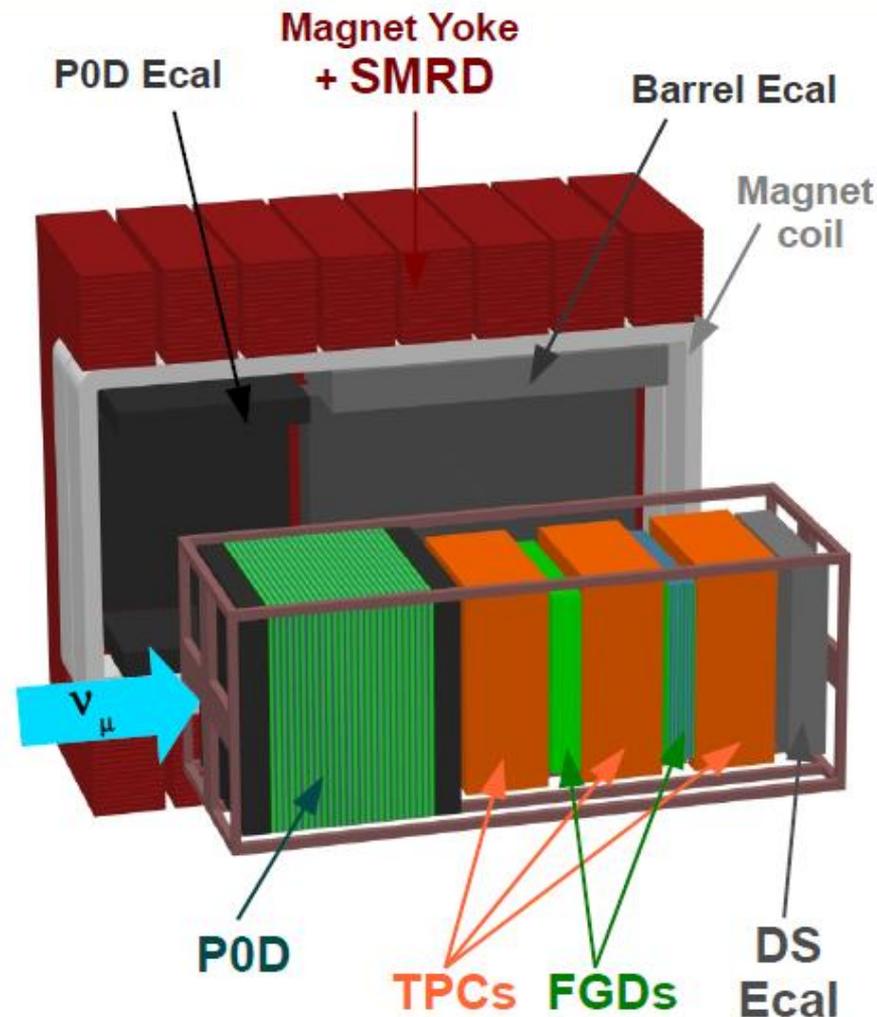
- **Objectif :**

Caractériser le faisceau avant oscillation
→ flux, spectre, composition du faisceau, mesures de sections efficaces.

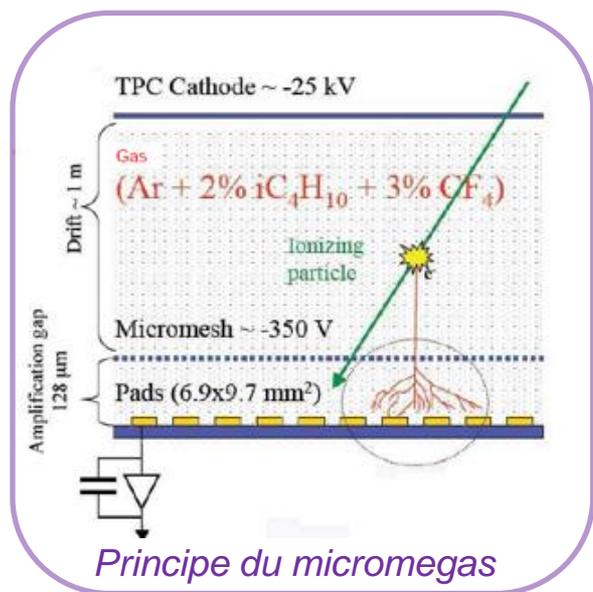
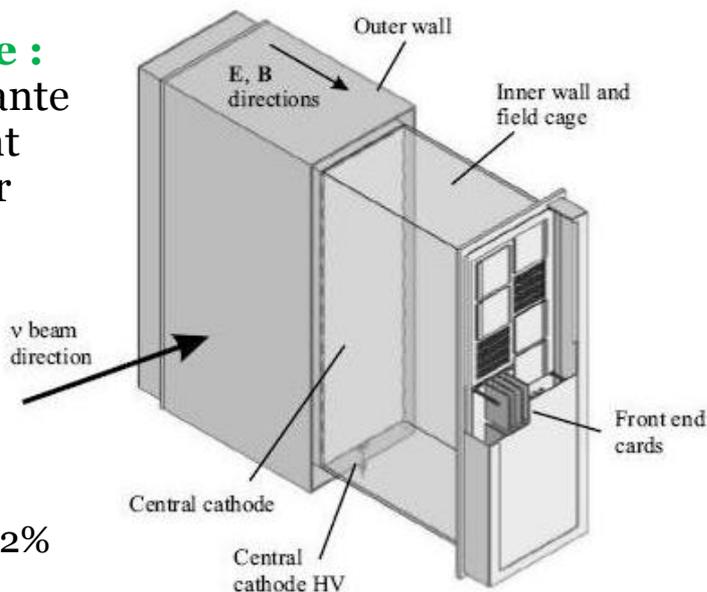
- Enveloppé de l'**aimant UA1** – avec un champ magnétique de 0,18 T.

- Différents types de sous-détecteur :

- **POD** (détecteur de π^0)
- **Tracker** : 3 TPCs (Time Projection Chambers) + 2 FGD (Fine Grained Detectors)
- **ECAL** (Calorimètre électromagnétique)
- **SMRD** (Détecteur de muons)



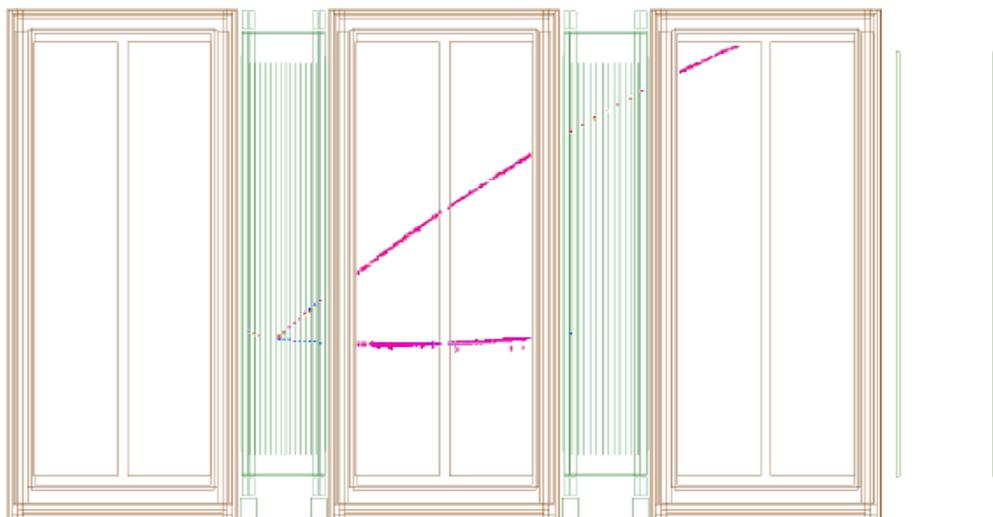
- **Chambre à projection temporelle :** après le passage d'une particule ionisante dans le volume de gaz, les charges sont emmenées vers le plan de lecture pour recueillir le signal.
- Très bonnes performances :
 - Résolution spatiale < 700 μm à 1m
 - Résolution du dE/dx < 10%
 - Précision sur l'échelle en impulsion < 2%



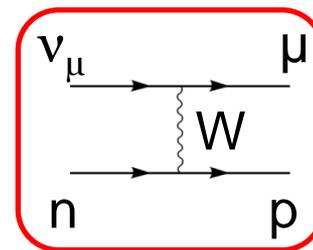
• Chaque plan de lecture des TPC de T2K est composé de 12 détecteurs MicroMegas (= 72 MM pour les 3 TPCs) (la conception et le tests de ses modules ayant été fait par Saclay)

- Quelques caractéristiques :
 - 36 colonnes * 48 rangées de pads (35*36 cm²)
 - Surface totale active ~ 9 m²
 - Uniformité du signal sur toute la surface

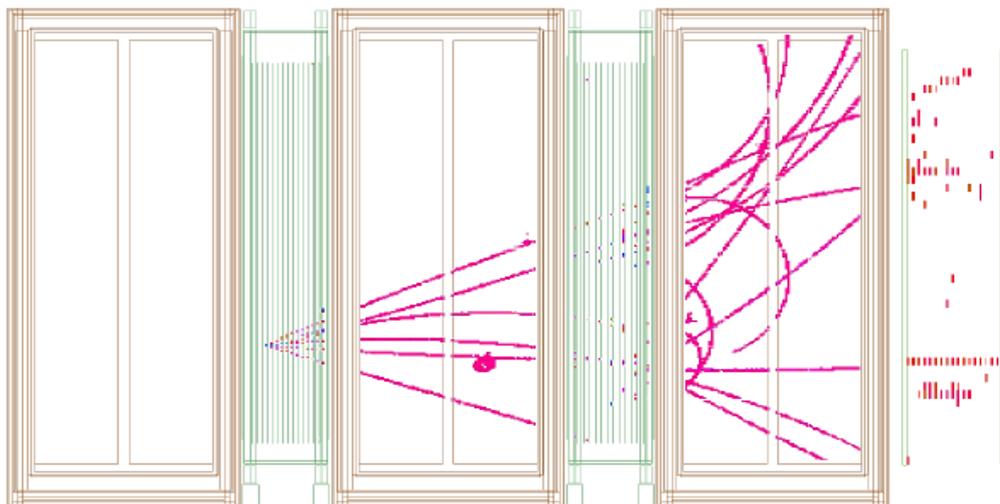
Event number : 24083 | Partition : 63 | Run number : 4200 | Spill : 0 | SubRun number : 6 | Time : Sun 2010-03-21 22:33:25 JST (Trigger: Beam Spill)



**Interaction Courant Chargé
(une trace type muon et
une trace proton)**

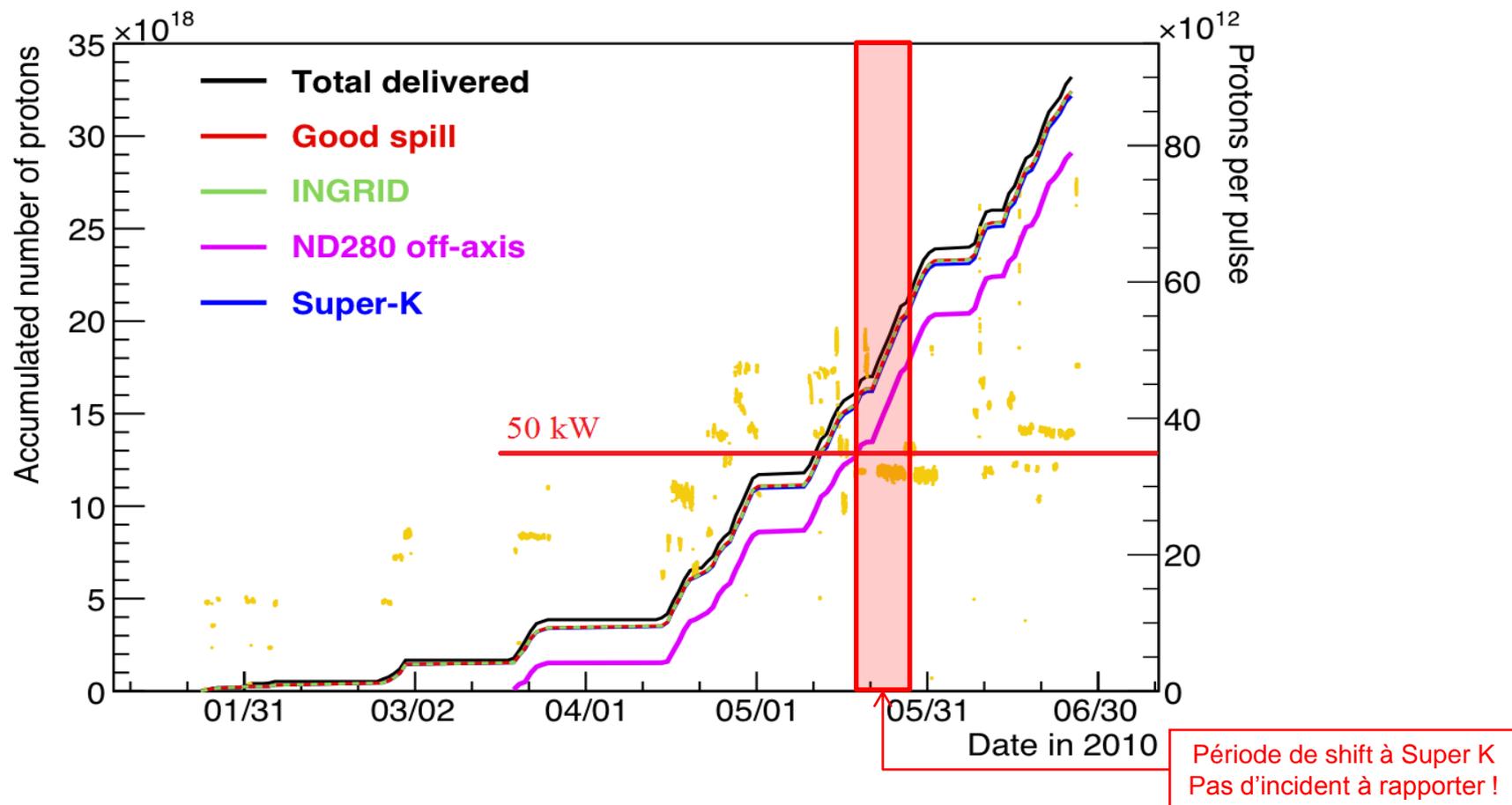


Event number : 110284 | Partition : 63 | Run number : 4200 | Spill : 0 | SubRun number : 25 | Time : Mon 2010-03-22 14:06:36 JST (Trigger: Beam Spill)

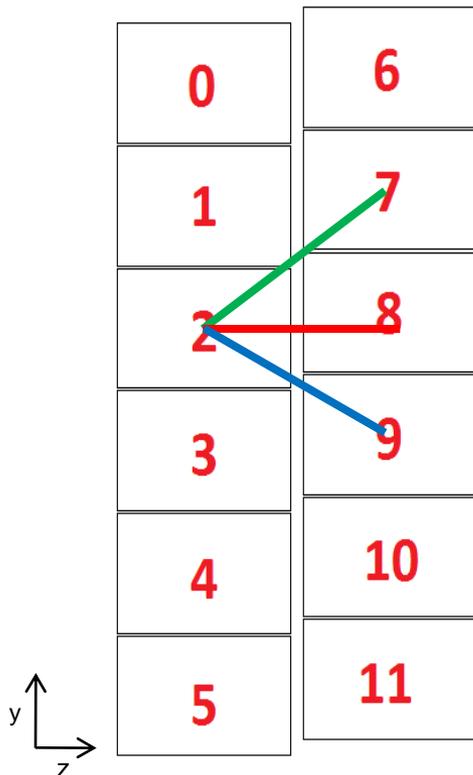


**Interaction
Deep Inelastic**

- L'expérience fonctionne et prends des données
- Premier run physique de T2K , de janvier à juin 2010 – faisceau stable à ~50 kW
- Montée en puissance pour les prochains runs



- Pendant ma première année de thèse, mon travail a principalement porté sur **l'alignement des modules micromegas** des TPCs en utilisant des traces de rayons cosmiques
- L'alignement fait partie des erreurs systématiques sur la mesure de l'impulsion (*Courbure* → *Energie mesurée des produits d'interactions* → *Energie des neutrinos*)

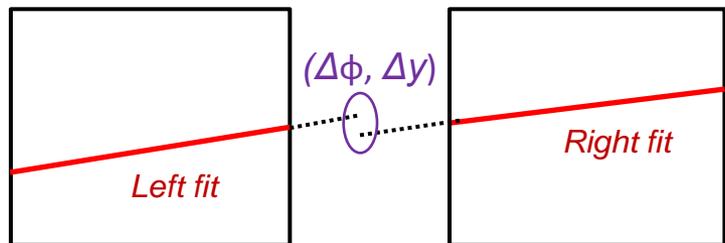


- La méthode d'alignement consiste à comparer l'alignement relatif en position (dy et dz) et en orientation ($d\phi$) des modules d'un plan de lecture

- Malheureusement la reconstruction des traces nous limite à une reconstruction " horizontale ", ainsi chaque module de gauche est comparé avec 3 modules de droite (16 configurations par plan – 96 en tout)

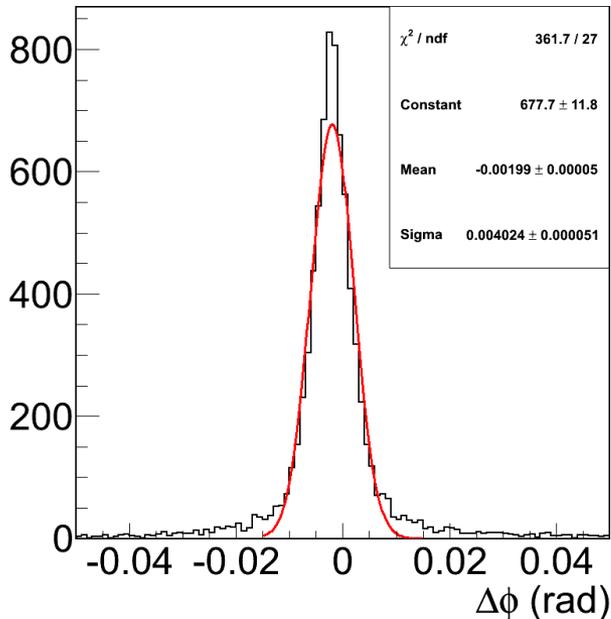
- La correction totale se fait ensuite de proche en proche en prenant le module 0 comme référence

- Pour observer le défaut d'alignement entre 2 modules, on se sert de 2 paramètres $\Delta\phi$ et Δy



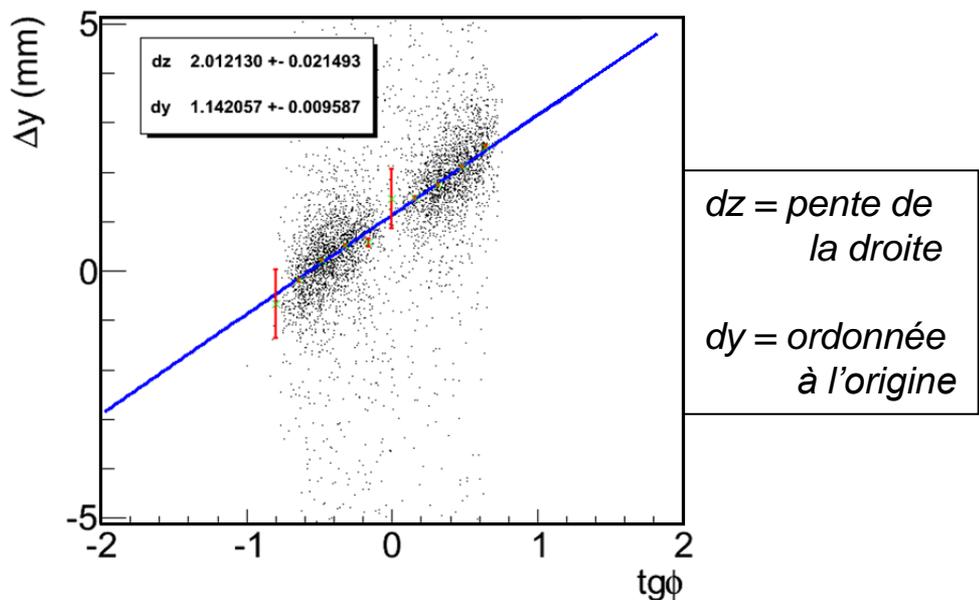
$\Delta\phi$: différence d'angle
 Δy : différence de position extrapolée entre les modules

- La mesure de la différence d'orientation est directe

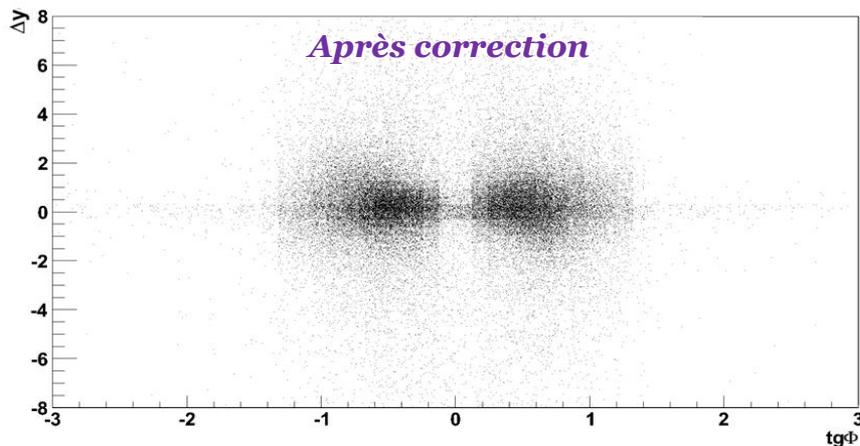
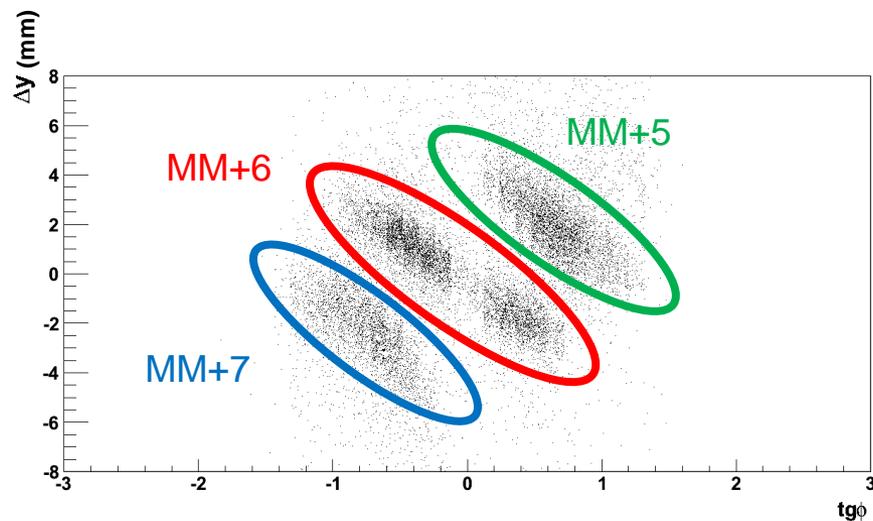


- Le calcul de l'alignement en position est indirect
 La valeur de Δy dépend de l'angle de la trace :

$$\Delta y = dz * \text{tg}(\phi) + dy$$



- Première observation d'un effet global inattendu !



- Observation d'un (grand) écart :

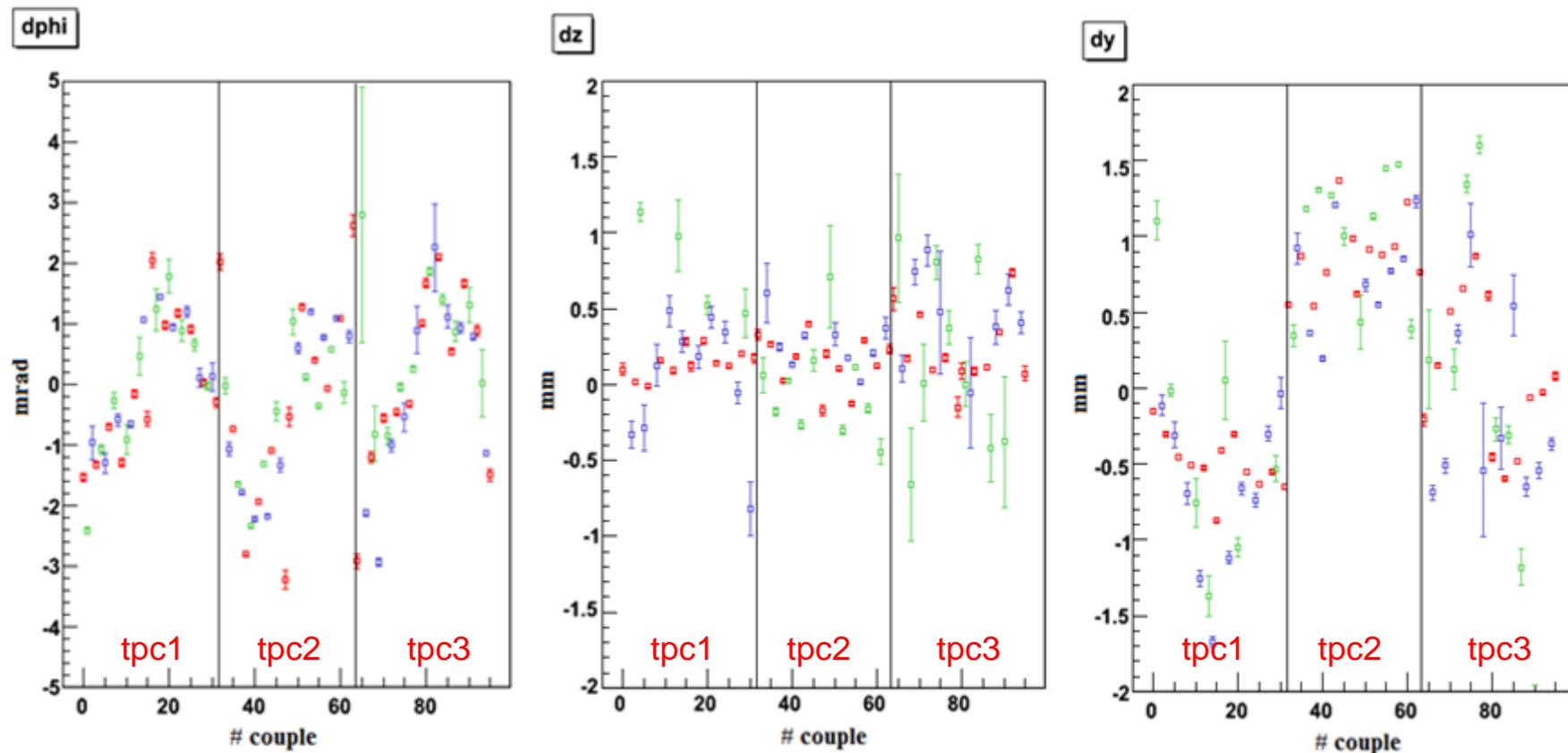
$dz \sim 3,5 \text{ mm}$ pour toutes les paires
 $dy \sim \pm 4,5 \text{ mm}$ pour les paires en diagonales

- Ceci était dû à une erreur de codage de l'écart entre les pads - trop petit de 0.1 mm

Corrigé ensuite dans le soft

Ce fut un premier test imprévu mais concluant de l'algorithme d'alignement

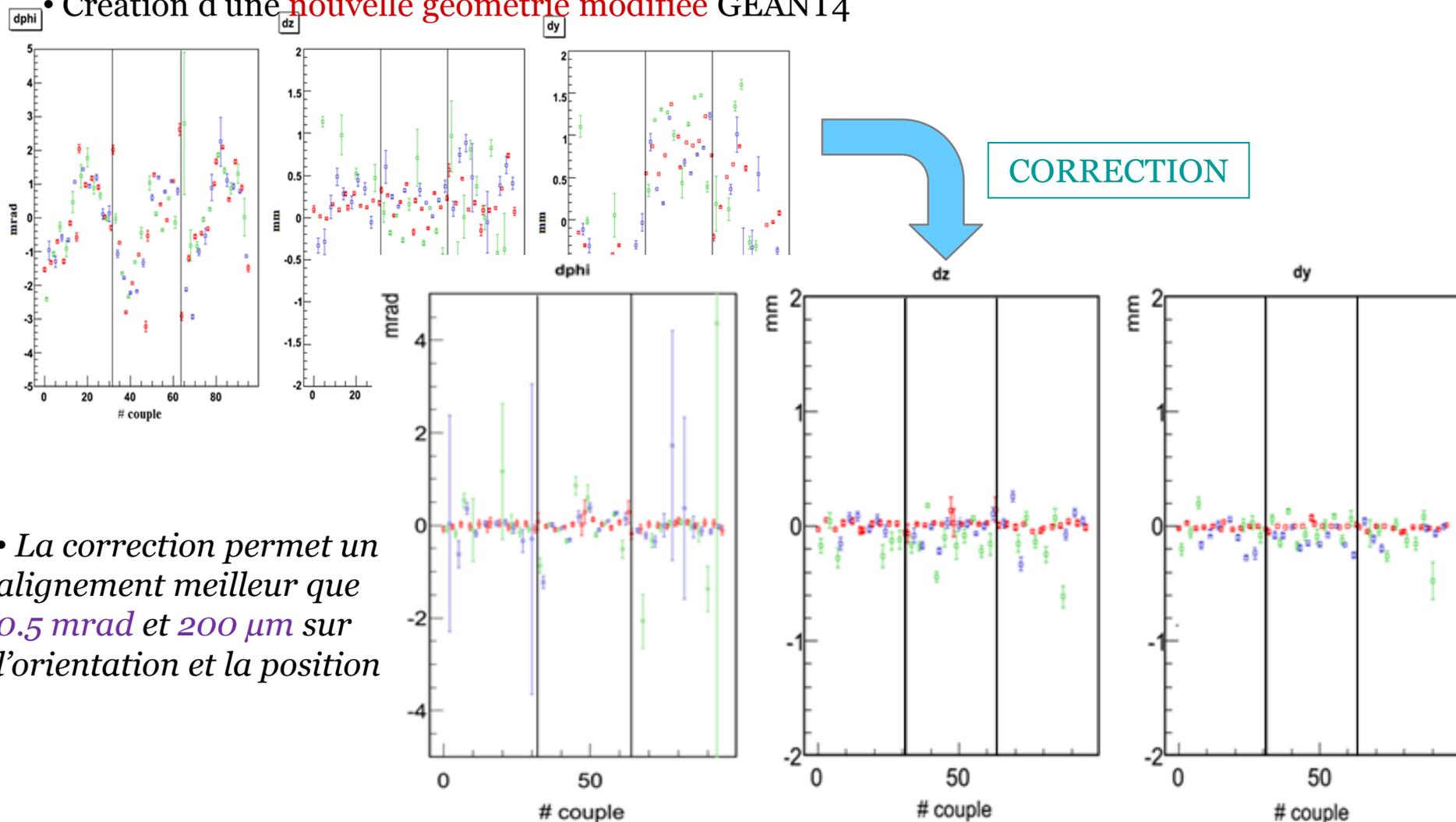
- On s'occupe ensuite des mesures des mauvais alignements individuels entre paires



- On observe des mauvais alignements de l'ordre du milliradian en orientation – et du millimètre sur la position
- Représente des variations de $\delta p/p$ de l'ordre de plusieurs %

- L'étape suivante est de tenter de corriger ces mauvais alignement

- Création d'une **nouvelle géométrie modifiée** GEANT4

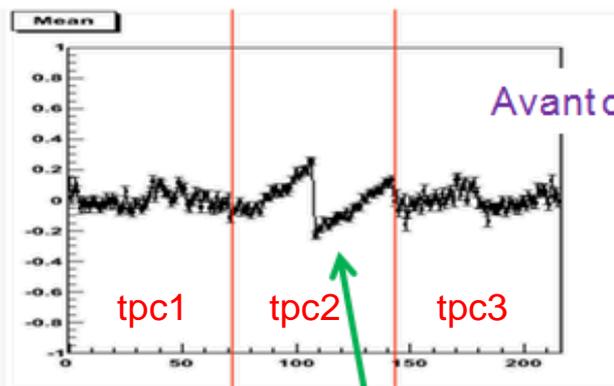


• *La correction permet un alignement meilleur que 0.5 mrad et 200 μm sur l'orientation et la position*

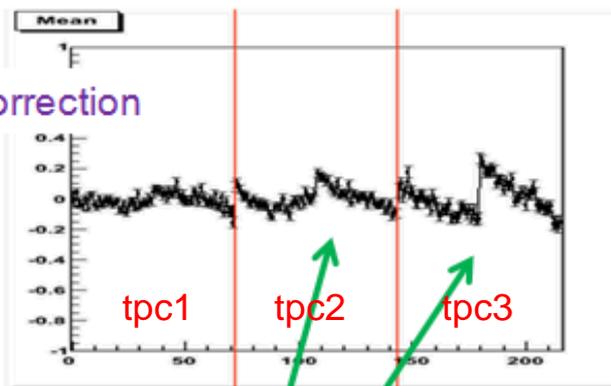
- Une des conséquences de l'alignement est une amélioration de la résolution des TPCs

Calcul des résidus moyens par colonne de pads

Plan 1

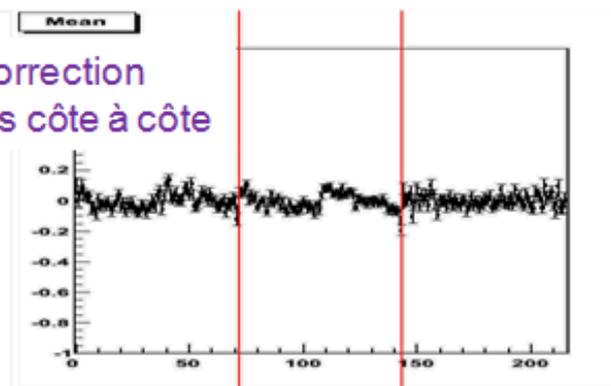
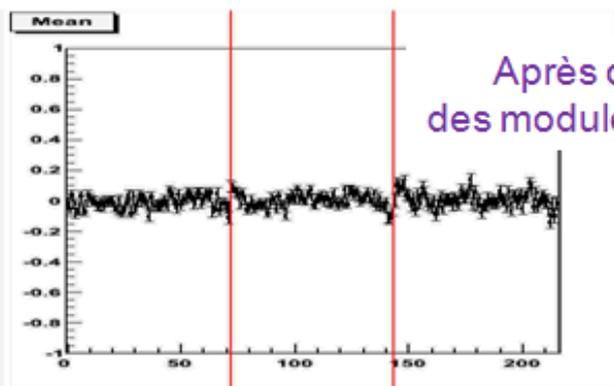


Plan 2



On observe des grandes variations
i.e. écart entre position mesurée et fit

L'amélioration des résidus est
évidente après correction
=
L'alignement fonctionne !



- Ma deuxième année de thèse est dédiée à l'analyse des données
Recherche d'apparition $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

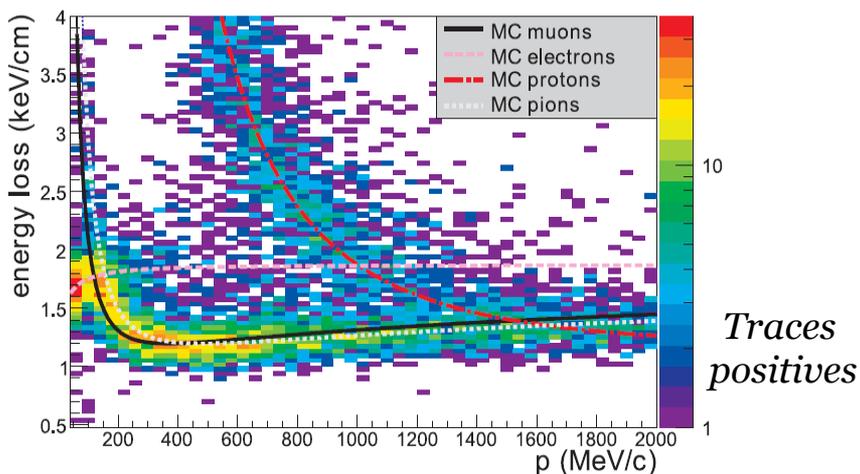
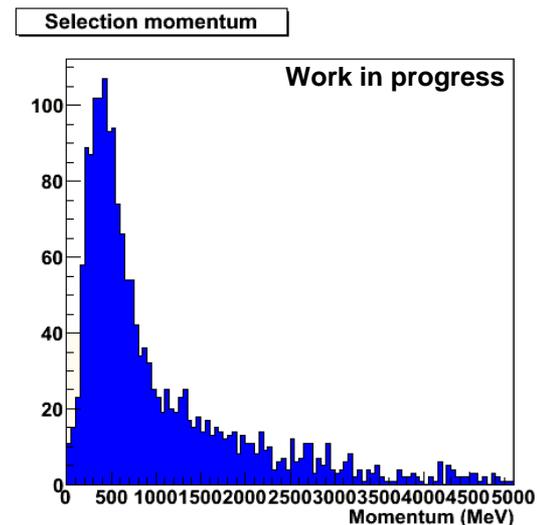
- Travail sur les données du détecteur proche :**

- Mesure du flux et du spectre ν_μ**
 - Sélection d'événements (interaction FGD, pas de trace TPC 1, etc...)
 - Etude des systématiques et des efficacités

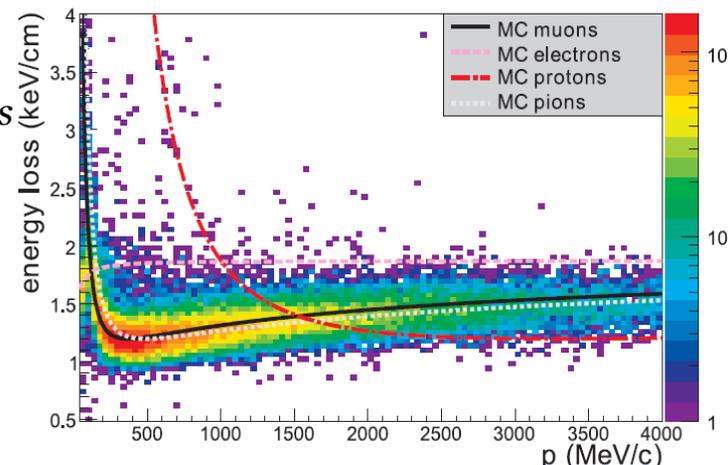
- Mesure de la composante ν_e intrinsèque du faisceau**

Doit être connu précisément

(représente 60% du bruit de fond au signal d'oscillation)



Traces négatives



- **Etude des données SK** (données déjà traitées en partie par le groupe T2K-SK)

- Comprendre et appliquer les coupures pour sélections à Super K
- Une vingtaine d'événements ν -T2K sélectionnés pour le premier run

- **Utiliser les données extraites du détecteur proche pour faire une extrapolation au détecteur lointain**

- Calcul du rapport lointain/proche (par Monte Carlo)

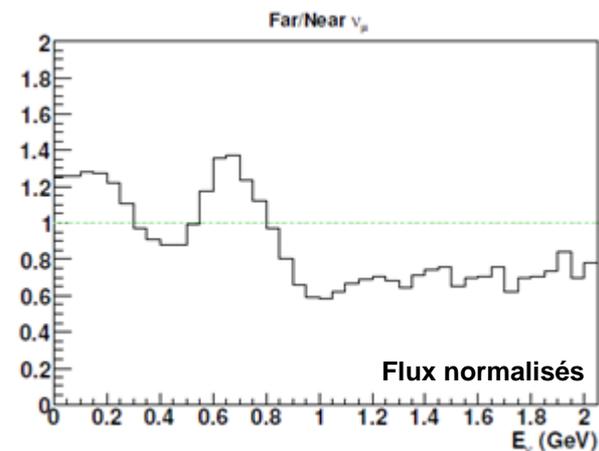
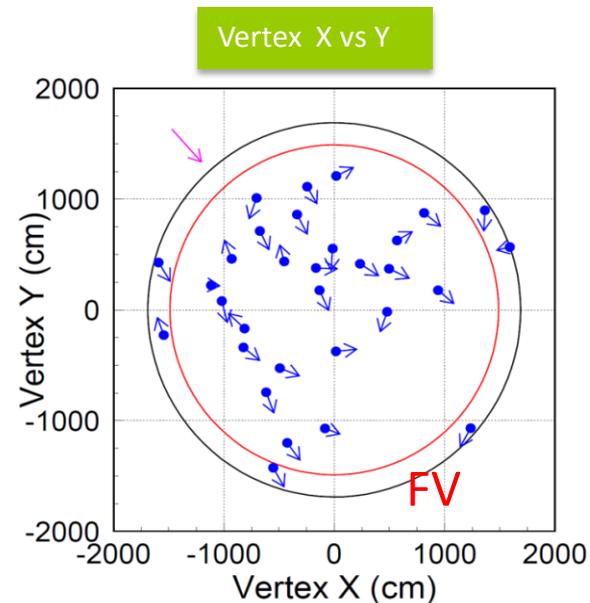
$$R^{F/N} = \frac{\phi^{SK}(E_\nu)}{\phi^{ND}(E_\nu)}$$

→ Détermination d'un nombre événements (/bruit de fond) ν_e si pas d'oscillation

- **Comparaison observé/attendu pour contraindre les paramètres d'oscillation**

Pour arriver à l'objectif de la thèse :

Donner une limite sur θ_{13} avec les données 2010/2011



- Faisant partie du travail de thèse, j'ai fait une semaine de shifts à Super-K, pendant la prise de données T2K en mai dernier
- Dans la salle de contrôle :
Attention aux température et pression du réservoir, à l'acquisition et aux supernovae !

*(En dehors de la salle de contrôle :
Attention aux chutes de pierre, aux camions
et aux ours !)*



T2K
Merci de votre attention !

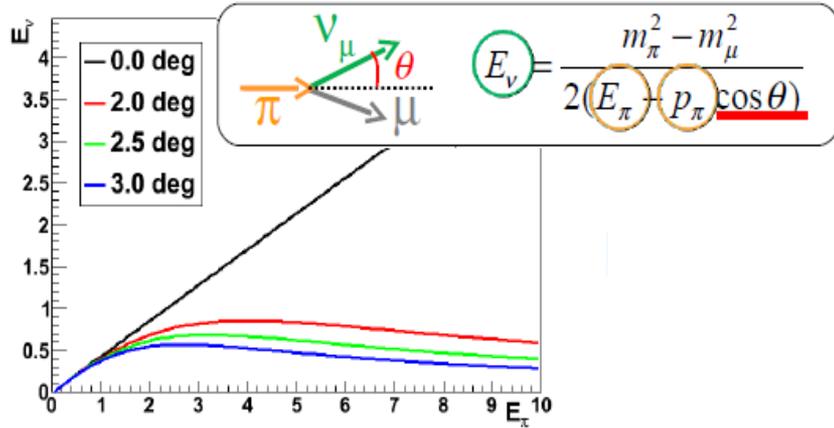
The T2K Collaboration



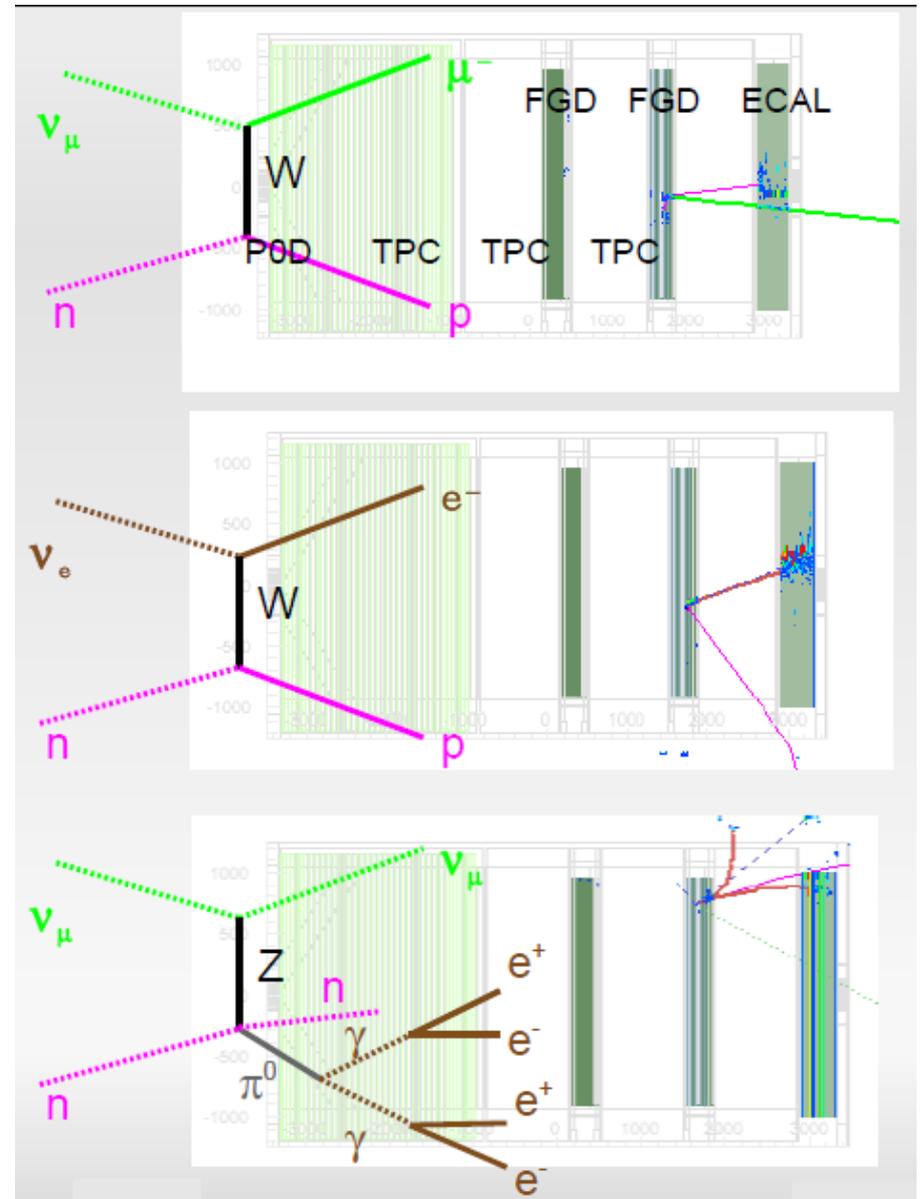
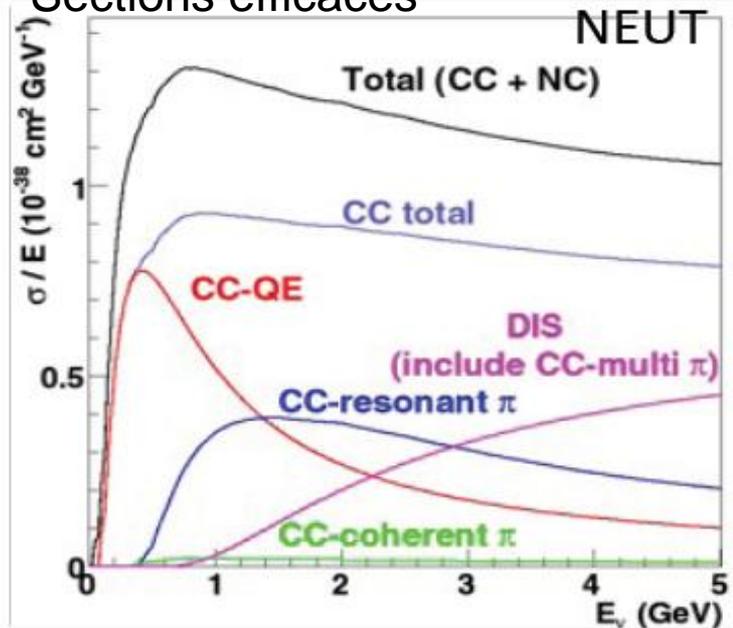
~500 members, 61 Institutes, 12 countries

Canada	Italy	Poland	Spain	STFC/RAL
TRIUMF	INFN, U. Roma	A. Soltan, Warsaw	IFIC, Valencia	STFC/Daresbury
U. Alberta	INFN, U. Napoli	H.Niewodniczanski, Cracow	U. A. Barcelona	
U. B. Columbia	INFN, U. Padova	T. U. Warsaw	Switzerland	USA
U. Regina	INFN, U. Bari	U. Silesia, Katowice	U. Bern	Boston U.
U. Toronto		U. Warsaw	U. Geneva	B.N.L.
U. Victoria	Japan	U. Wroclaw	ETH Zurich	Colorado S. U.
York U.	ICRR Kamioka			Duke U.
	ICRR RCCN	Russia	United Kingdom	Louisiana S. U.
France	KEK	INR	Imperial C. London	Stony Brook U.
CEA Saclay	Kobe U.		Queen Mary U. L.	U. C. Irvine
IPN Lyon	Kyoto U.	S. Korea	Lancaster U.	U. Colorado
LLR E. Poly.	Miyagi U. Edu.	N. U. Chonnam	Liverpool U.	U. Pittsburgh
LPNHE Paris	Osaka City U.	U. Dongshin	Oxford U.	U. Rochester
	U. Tokyo	U. Sejong	Sheffield U.	U. Washington
Germany		N. U. Seoul	Warwick U.	
U. Aachen		U. Sungkyunkwan		

Cinématique hors-axe



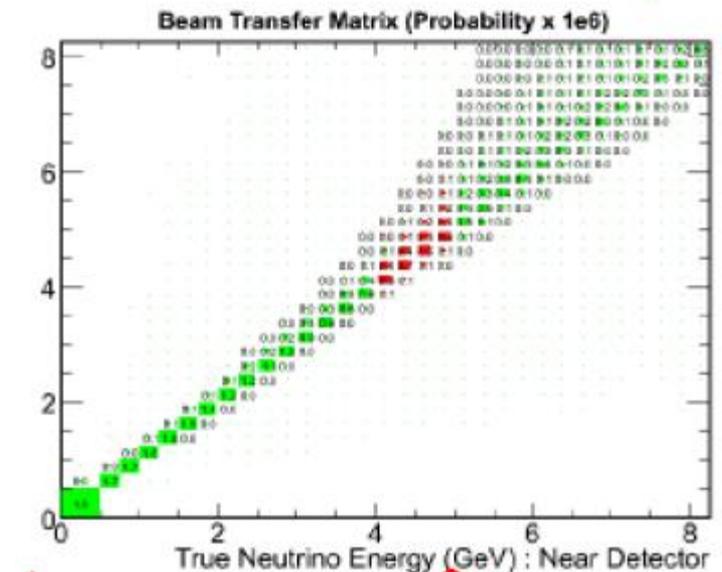
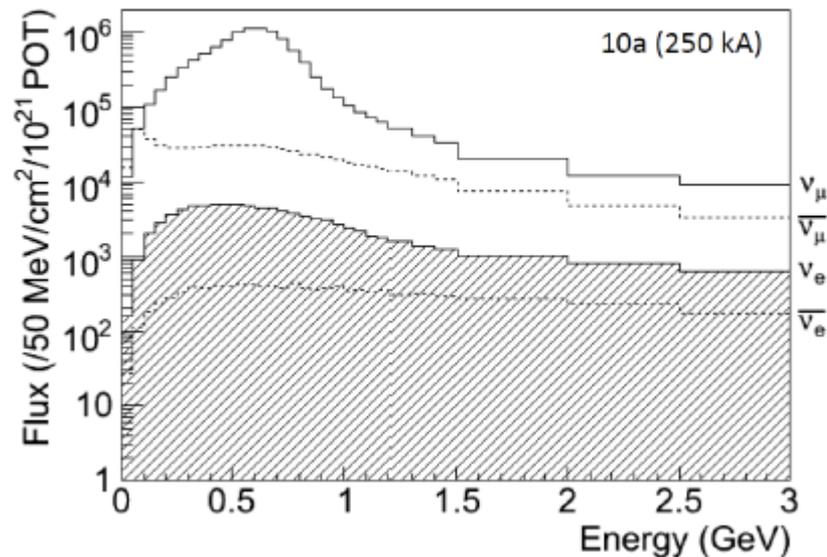
Sections efficaces



- Energie d'un neutrino pas CCQE

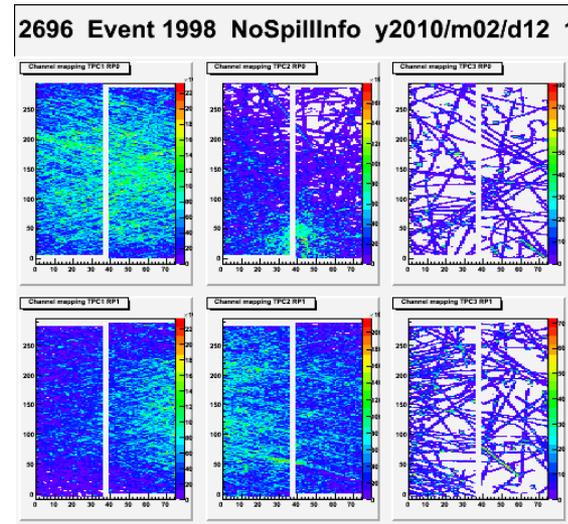
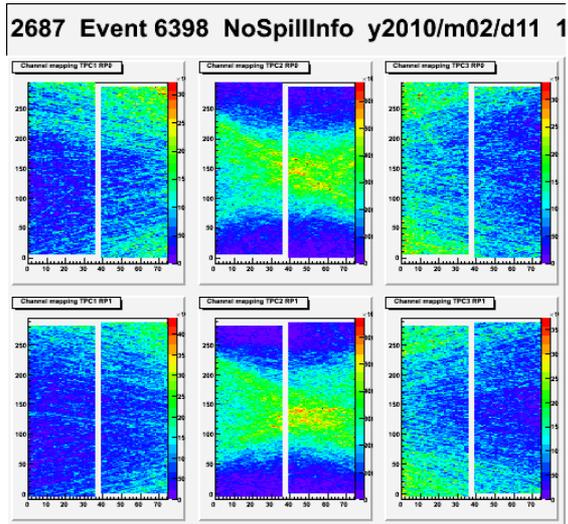
$$E_\nu = \frac{m_p^2/2 - m_n^2/2 - m_l^2/2 + m_n E_l}{m_n - E_l + p_l \cos \theta_l}$$

ν_μ and ν_e energy spectra at Super-K



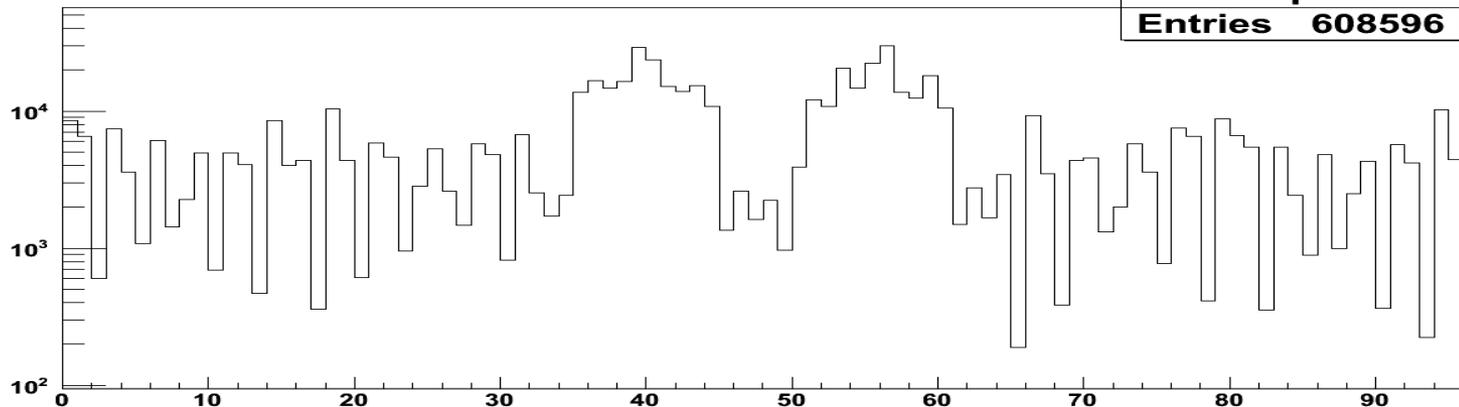
La mesure des paramètres dz et dy nécessite beaucoup de statistiques
 ~1000 traces par couple

Trigger FGD

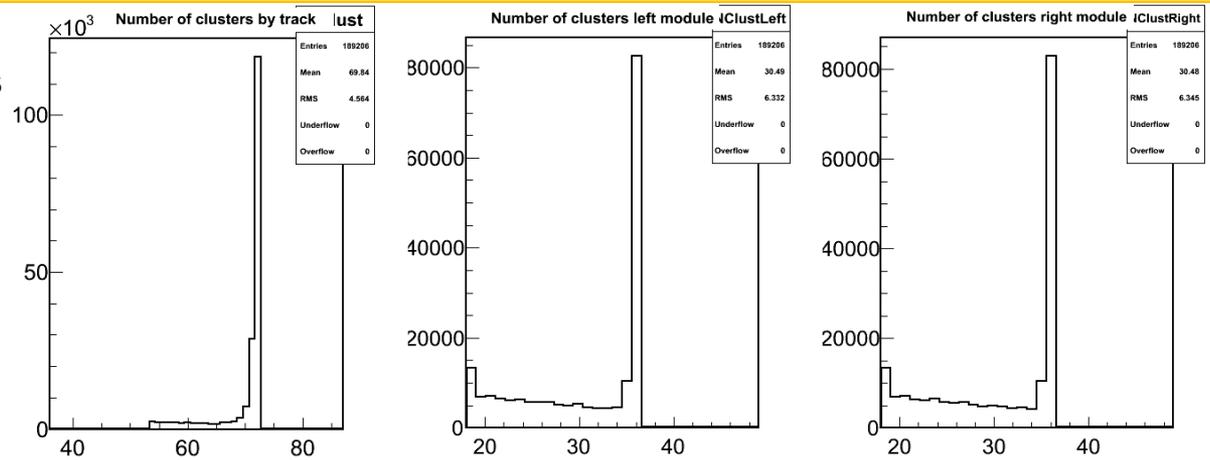


Trigger SMRD

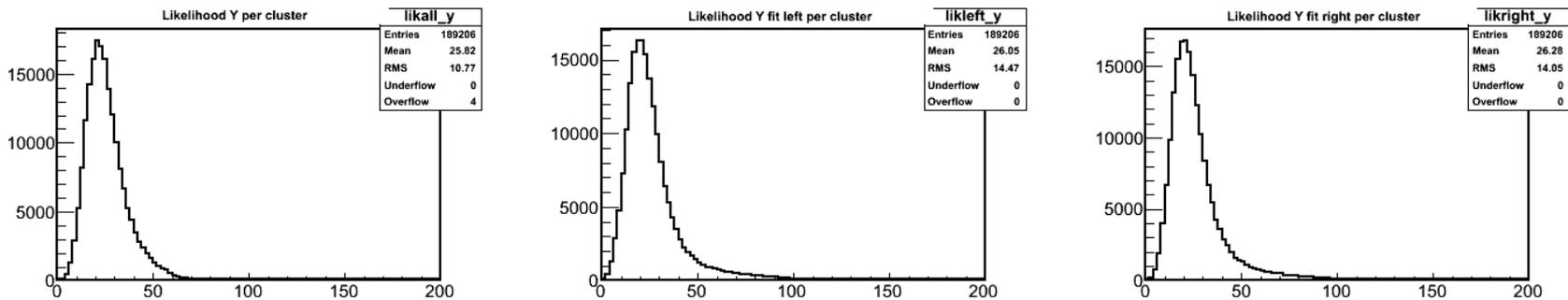
Population des couples



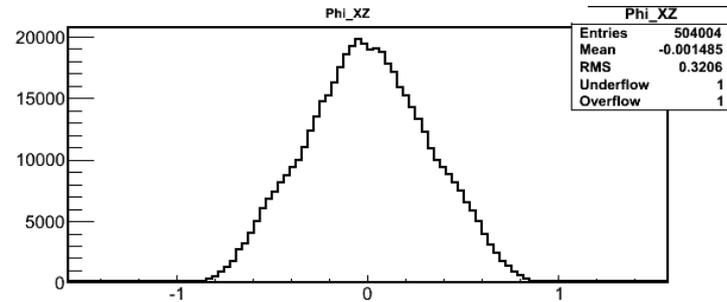
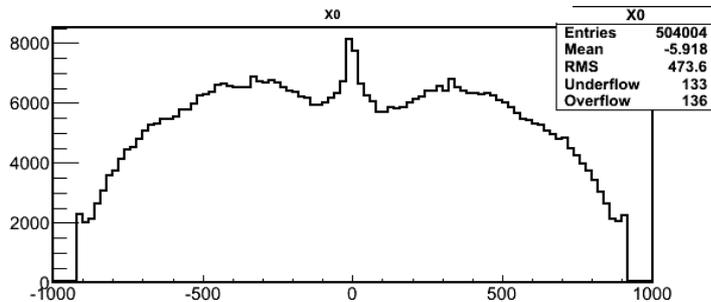
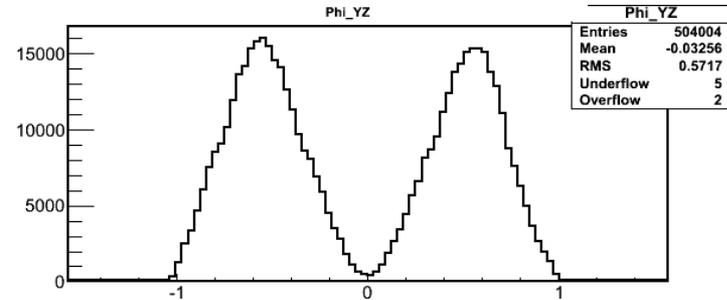
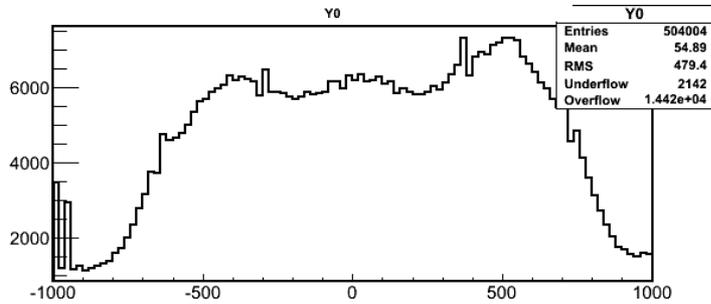
Nombre de clusters par traces



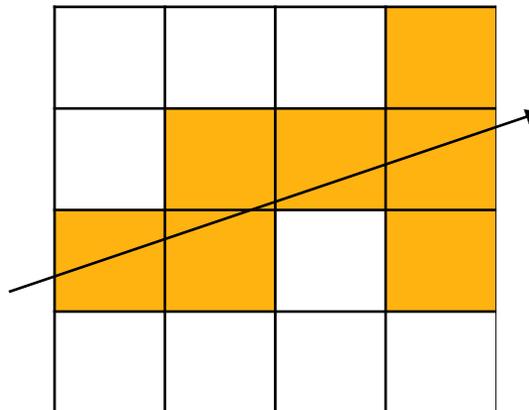
Valeur du likelihood des différents fits



Paramètres des traces

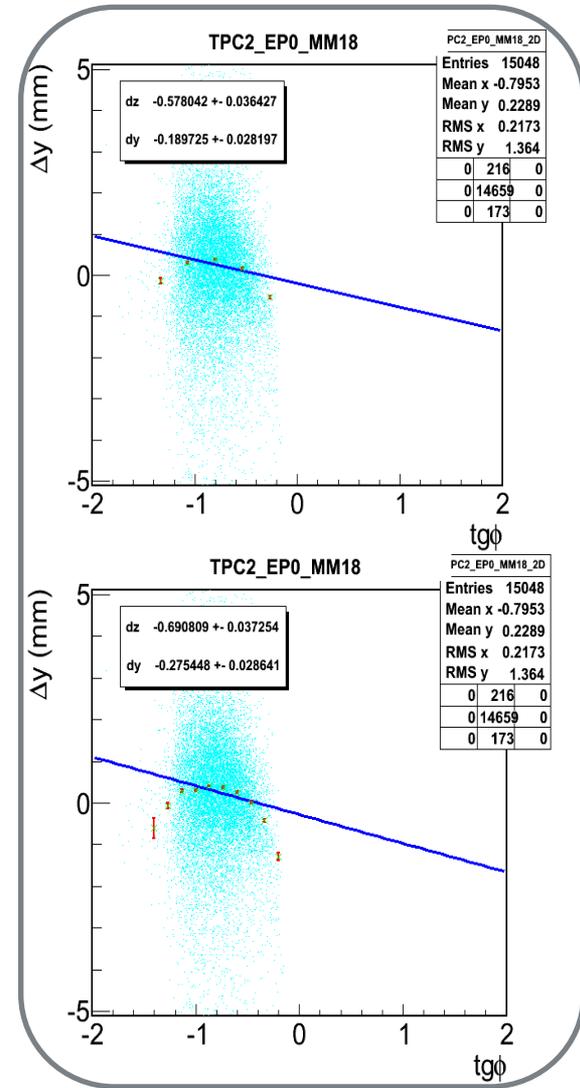
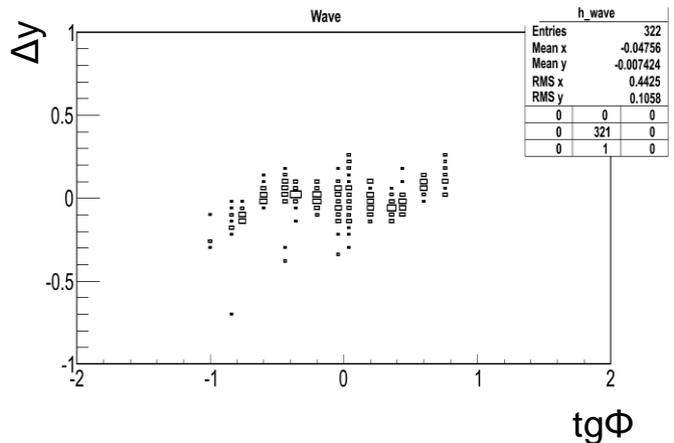
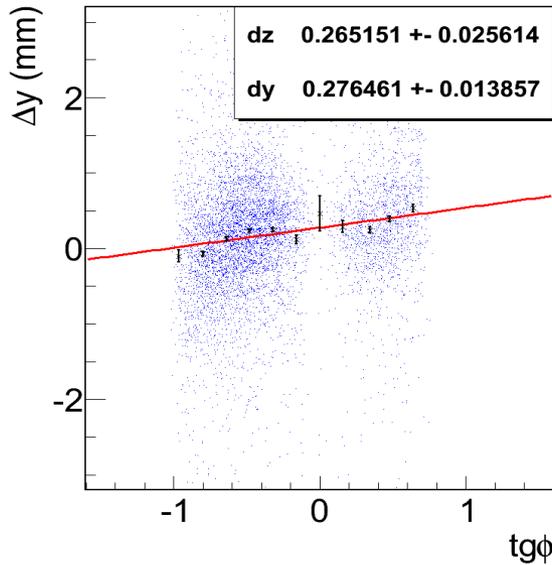


clustering

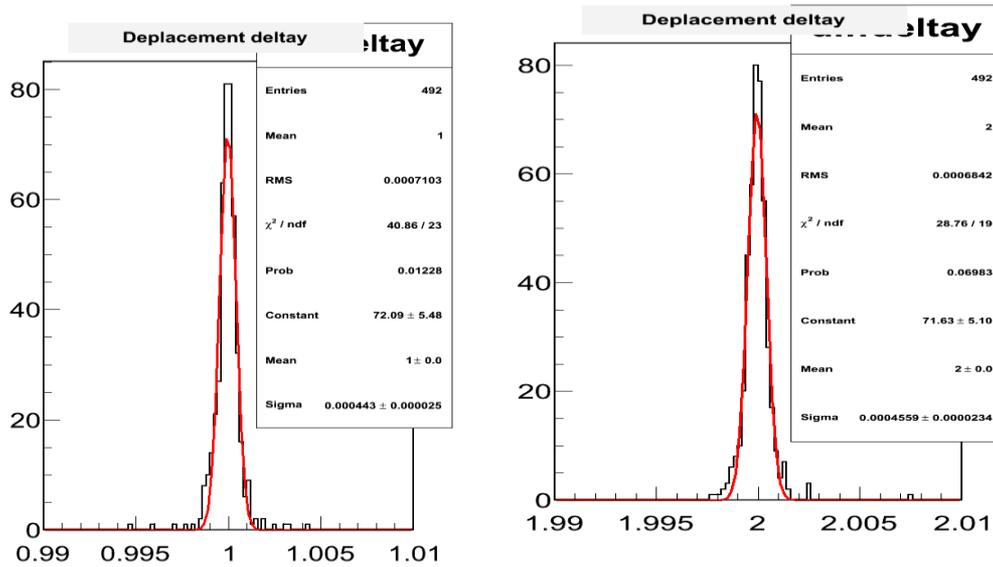


Effet de reconstruction en vague...

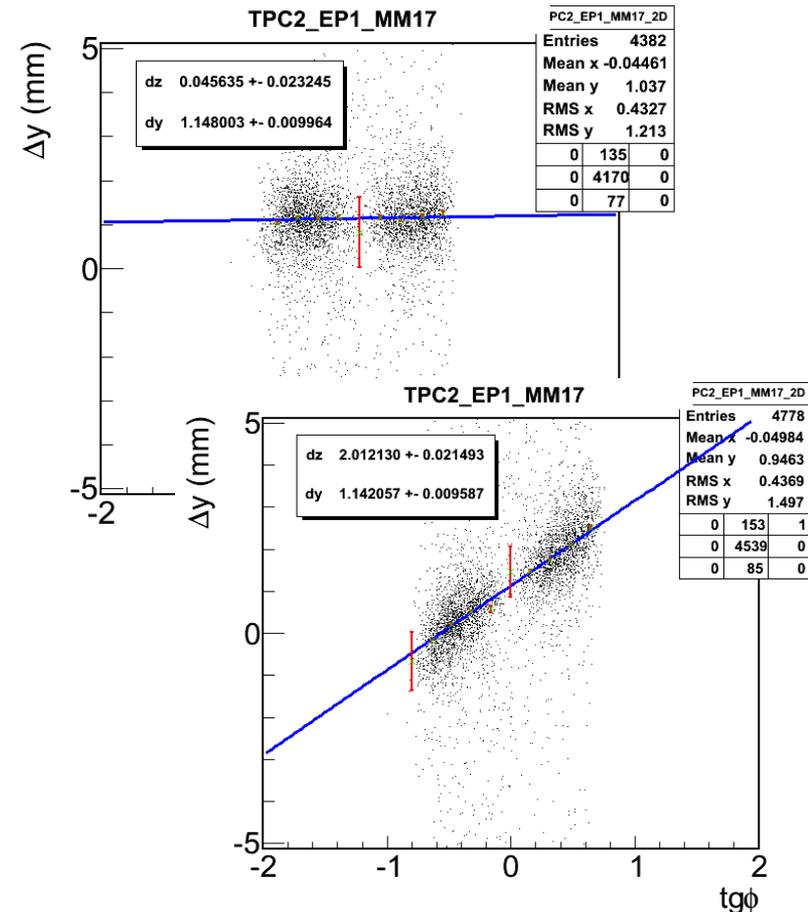
Minimisé en diminuant au maximum le nombre de points pour moyenner l'effet



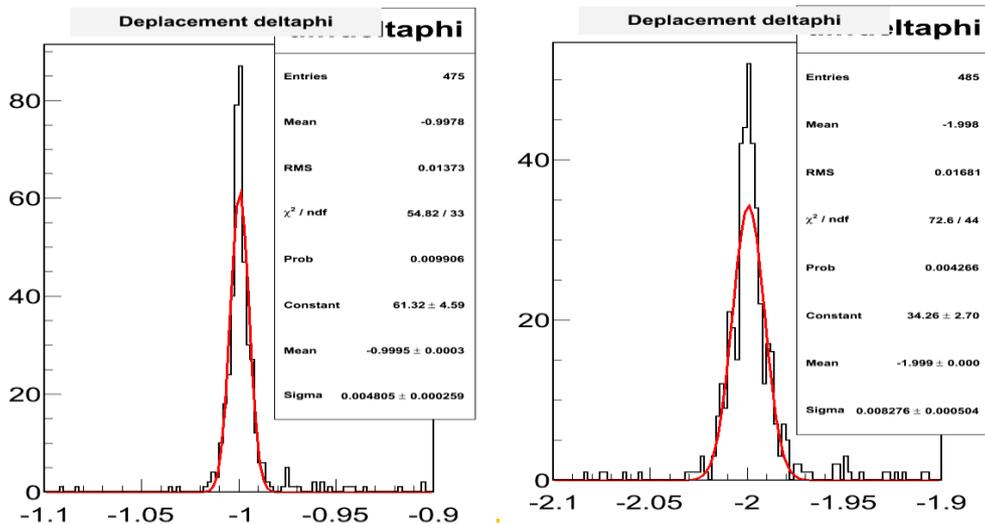
Mesure du déplacement vertical d'une colonne



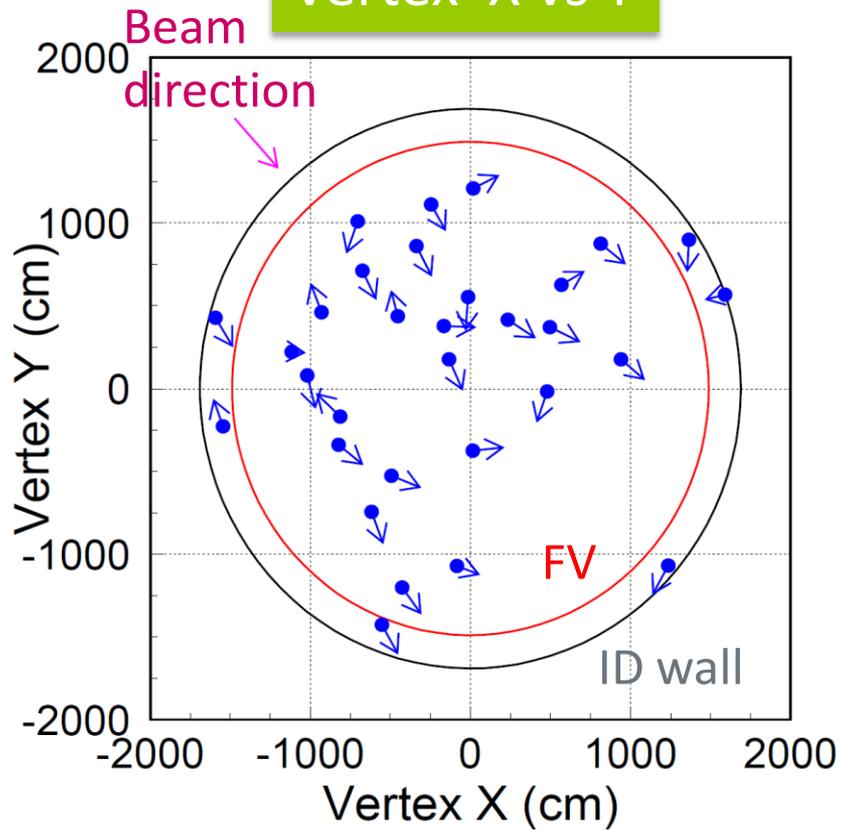
Mesure d'un déplacement en z



Mesure d'une rotation d'une colonne



Vertex X vs Y



Vertex R vs Z

